

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 - Strojírenství

Materiály a technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

**Realizace mechanizovaného svařovacího pracoviště určeného
k měření teplotních polí a deformací**

**Realization of mechanized welding workstation designed
for measuring of heat fields and deformation**

David Nohýnek
KSP - SM - B51

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D. - TU v Liberci
Konzultant bakalářské práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D. - TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	59
Počet tabulek	09
Počet příloh	28
Počet obrázků	61

Datum: 24.5.2013

Anotace

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní

**Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program: B2341 - Strojírenství

Student: David Nohýnek

Téma práce: Realizace mechanizovaného svařovacího pracoviště
určeného k měření teplotních polí a deformací

Realization of mechanized welding workstation
designed for measuring of heat fields and deformation

Číslo BP: KSP-SM-B51

Vedoucí BP: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.

Konzultant: Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Abstrakt:

Předložená bakalářská práce je zaměřena na realizaci mechanizovaného svařovacího pracoviště určeného k měření teplotních polí a deformací v průběhu svařování a chladnutí svaru. Práce je rozdělena do dvou etap, teoretické a experimentální. V teoretické části jsou popsány teoretické principy zařízení využívaných v části experimentální. Dále je zde popsán simulační program Sysweld, pro který jsou veškerá data z mechanizovaného svařovacího pracoviště shromažďována.

V praktické části je popsána realizace pracoviště na základě dodaného návrhu. Pro pracoviště byla vyhotovena kompletní výkresová dokumentace. Dále byla experimentálně ověřena funkčnost tohoto zařízení, včetně popisu nastavení měřicího softwaru a vyhodnocení naměřených procesních i technologických údajů.

Klíčová slova: svařování, teplotní pole, LVDT posuvová čidla, monitorizace procesních veličin

Abstract:

The presented bachelor's thesis is focused on realization of mechanized welding workstation designed for measuring of heat fields and deformation during production and cooling down of the welds. This thesis consists of two main parts, theoretical and experimental. The theoretical part consists of theoretical principles that are used in the practical part. Furthermore, this thesis contains the description of Sysweld program, for whom are gathered the output data from the mechanized welding workstation.

The experimental part of the thesis describes the realization of the workplace according to the submitted design, including complete design documentation. Subsequently, there was experimentally verified the function of the unit, including the specification of adjusting the measuring software and evaluation of measured processional and technological values.

Key words: welding, heat fields, LVDT linear position sensors, monitorization of processional values

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....
David Nohýnek
Veselá 36
295 01 Mnichovo Hradiště

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky.

Děkuji také Ing. Josefu Černohorskému, Ph.D. za elektroinstalaci a tvorbu softwaru.

Obsah

Úvod	1
1 Simulační program SYSWELD	2
1.1 Základní moduly programu	2
1.2 Vstupní data simulačního programu	3
2 Systém pro monitorování a dokumentaci svarů	
Weldmonitor	7
2.1 Weldmonitor hardware	7
2.2 Weldmonitor software	9
2.3 Monitorování procesu svařování	9
3 Měření teploty pomocí termočlánků	11
3.1 Typy termočlánekových spojů	11
4 Měření lineárního posuvu pomocí LVDT čidel	13
4.1 Charakteristika čidla	13
4.2 Princip funkce	15
5 Návod k obsluze zařízení DiagWeld V0.12.04.2	18
5.1 Ovládání	18
5.2 Zápis na USB	21
6 Experimentální část - Realizace mechanizovaného svařovacího pracoviště určeného k měření teplotních polí a deformací	22
6.1 Přípravek pro upnutí	24
6.2 Přípravek pro měření posuvů a deformací	27
7 Prokázání funkčnosti měřícího zařízení	29
7.1 Příprava měřícího pracoviště a zkušební vzorku	29
7.2 Postup svařování a svař. parametry při vlastním experimentu	37
8 Závěr - Vyhodnocení funkčnosti experimentálního pracoviště	49
9 Seznam použitých zdrojů	50
10 Seznam příloh	51

Seznam použitých symbolů a zkratk

VaV	- Věda a Výzkum
LVDT	- Linear Variable Differential Transformer
GMAW	- Gas Metal Arc Welding
MAG	- Metal Active Gas
MKP	- Metoda Konečných Prvků
MKD	- Metoda Konečných Diferencí
ARA	- Anizotermický Rozpadu Austenitu
IRA	- Izotermického Rozpadu Austenitu
MIG	- Metal Inert Gas
TIG	- Tungsten Inert Gas
PC	- Personal Computer
WM-UI	- Weldmonitor module UI (napětí a proud)
USB	- Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
CSV	- Formát ukládání dat (Comma-Separated Values, hodnoty oddělené čárkami)
WPS	- Welding Procedure Specification (specifikace postupů svařování)
WPQR	- Welding Procedure Qualification Record (protokol o kvalifikaci postupu svař.)
$q(x,y, \xi)$	- hustota tepelného toku do materiálu [$W \cdot m^{-3}$]
Q	- celkový výkon zdroje [W]
a,b,c	- parametry natavené oblasti [m]
x,y,z	- souřadnice bodů [m]
f_1, f_2	- konstanty ovlivňující rozložení intenzity toku energie do materiálu [-]
τ	- celkový čas svařování [s]
t	- okamžitý čas svařování [s]
v	- rychlost svařování [$m \cdot s^{-1}$]
ξ	- poloha zdroje v závislosti na svařování [m]
z_k	- souřadnice osy z při ukončení svařování [m]
E_{out}	- rozdíl napětí indukovaného na sekund. vinutích [V]
E_1	- napětí indukované na vinutí S1 [V]
E_2	- napětí indukované na vinutí S2 [V]
d	- průměr drátu [mm]
Q_c	- hodnota celkového vneseného tepla [$kJ \cdot cm^{-1}$]
U	- napětí svařovacího proudu [V]
I	- intenzita svařovacího proudu [A]
v	- rychlost svařování [$cm \cdot s^{-1}$]
η	- koeficient účinnosti přenosu tepla [-]

Úvod

Svařování je pevné a nerozebratelné spojení kovových částí za použití tepla, tlaku, tepla a tlaku, někdy i za pomoci přídavného materiálu podobného nebo stejného, výjimečně jiného chemického složení schopného vytvořit metalurgické spojení se základním materiálem. /1/

Jedná se o technologii s velkou produktivitou a malým množstvím odpadu. Materiál v okolí svaru je tepelně ovlivněn, mění se jeho mechanické vlastnosti, vznikají pnutí a deformace. Tato technologie se používá jak v hromadné a kusové výrobě, tak v opravárenství. V současné době je podle ČSN EN ISO 4063 evidováno více jak 90 různých metod svařování, pájení a tepelného dělení materiálů. Nejpoužívanější technikou svařování však stále zůstává svařování elektrickým obloukem.

Z hlediska zvládnutí procesu svařování u ocelí, jsou dnes běžně používány nelegované oceli s % C do 0.2, ale také řada středně a vysokolegovaných ocelí. Stále však existuje řada materiálů, u nichž je svařitelnost obtížná, nebo možná pouze za přesně definovaných technologických podmínek. Pro studium technologické zpracovatelnosti těchto materiálů a pro optimalizaci postupu svařování WPS, jsou využívány numerické simulace svařování a tepelného zpracování.

Jedním z těchto programů je také simulační program Sysweld, který je využíván na Katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci jak k řešení diplomových a bakalářských prací, tak především k řešení úkolů VaV v rámci grantových projektů. Také návrh, vytvoření a odzkoušení mechanizovaného svařovacího pracoviště popsaného v této bakalářské práci byly realizovány v rámci grantového projektu TAČR TA02010992.

Simulační programy (jak bude ukázáno dále) jsou velice náročné na množství a kvalitu vstupních dat. Nejedná se však pouze o materiálová vstupní data, ale také o procesní údaje měřené při svařování a sloužící k definování modelu zdroje tepla, nebo o údaje o teplotních polích a deformacích, sloužících k verifikaci simulačních výpočtů. Právě k získání těchto údajů byl směřován návrh a realizace popisovaného pracoviště.

V příloze této bakalářské práce budou uvedeny ukázky procesních a technologických vstupních a verifikačních dat získaných na základě provedení experimentu svařování vícevrstvého svaru.

Tato práce vznikla za podpory grantového projektu TAČR TA02010992.

1 Simulační program SYSWELD

SYSWELD je simulační program pracující na základě metody konečných prvků (MKP). Tento přístup vznikl z důvodu požadavků velké tvarové variability a potřeby řešit i jednotlivé podskupiny prostorového modelu samostatně. Proto je zde možné na rozdíl od metody konečných diferencí (MKD), použít libovolný tvar jednotlivých elementů. Z matematického hlediska je metoda konečných prvků (MKP) metodou, pro nalezení aproximovaného řešení parciálních diferenciálních i integrálních rovnic, například rovnice vedení tepla. /2/

1.1 Základní moduly programu

Program SYSWELD je rozdělen do několika základních modulů, které spolu navzájem komunikují. První modul se nazývá **Geom./Mesh**. Slouží k vytváření simulačních modelů, lze v něm vytvářet 2D a 3D modely s definovanou trajektorií pohybu zdroje tepla pro svařování a pomocné předehevy.

Dalším modulem je **SYSWELD/Generic**. Tímto modulem je možno definovat všechny teplotně-metalurgické děje vznikající při ohřevu a chladnutí materiálu. Jde tedy o výpočet množství a rozložení jednotlivých metalurgických fází v závislosti na definovaných ARA a IRA diagramech.

Modul **H. T. Advisor** (Heat Treatment Advisor) řeší problematiku sdílení tepla v modelu, především vedení tepla v základním materiálu a sálání tepla do okolí. Konvekční sdílení tepla vznikající ve svarové lázni se pro přílišnou složitost nepoužívá, ale i proto, že se významněji projevuje až od rychlosti 1 m/min a lze jej úpravou tvaru tepelného zdroje eliminovat.

Welding Advisor umožňuje definovat tepelný zdroj a jeho trajektorii. Načte prostorový model z modulu Geom./Mesh, přiřadí mu příslušný materiál z mat. databáze, určí způsoby sdílení tepla z modulu H. T. Advisor a provede teplotní a mechanickou analýzu.

Posledním modulem je **Assambly Advisor**, který pracuje s vypočítanými daty z modulu Welding Advisor. Zde se uplatňuje tzv. „Lokálně-globální přístup“, umožňující počítat rozměrné konstrukční celky na základě dílčích svarů.

Obecně lze říci, že proces simulace v programu SYSWELD je rozdělen na dvě základní části, a to teplotně-metalurgickou analýzu a mechanickou analýzu. Teplotně-metalurgická část umožňuje výpočet nestacionárních teplotních polí, výpočet fázových transformací, nebo výpočet tvrdosti struktury a velikosti austenitického zrna.

Mechanická část pracuje s výsledky teplotně-mechanické analýzy a nelze jí tedy bez předchozího kroku provést. Výsledkem jsou především napěťová a deformační pole. /2/

1.2 Vstupní data simulačního programu

Všechny simulační programy mají za úkol co nejpresněji popsat reálné děje nebo se jim co nejvíce přiblížit. Mezi jedny z nejnáročnějších analýz na kvalitu a množství vstupních dat patří analýzy svařovacích procesů. Vstupní data svařovacích analýz se dělí na:

- 1) Vstupní data materiálová
- 2) Vstupní data pro určení a popis tvaru svařovacího zdroje
- 3) Vstupní data pro tvorbu prostorového modelu

Vstupní data materiálová

Materiálová vstupní data je třeba získat ve formě teplotních závislostí. Některé tyto závislosti lze nalézt v literatuře, převážná část těchto dat je však zjišťována experimentálně. Problematický je zde i fakt, že materiálová vstupní data je třeba získat pro všechny počítané metalurgické fáze daného materiálu. Pro teplotně-metalurgickou analýzu je třeba získat teplotní závislost těchto materiálových vstupních dat:

- Chemické složení
- Data pro fázové transformace - diagramy ARA a IRA
- Teplotní závislost koeficientu přestupu tepla do okolí β
- Teplotní závislost hustoty ρ
- Teplotní závislost měrné teplotní vodivosti λ
- Teplotní závislost měrného tepla c

Pro mechanickou analýzu je třeba určit teplotní závislost těchto materiálových vstupních dat:

- Teplotní závislost meze kluzu R_e
- Teplotní závislost meze pevnosti R_m
- Teplotní závislost Youngova modulu pružnosti E
- Teplotní závislost koeficientu lineární roztažnosti α
- Teplotní závislost Poissonovy konstanty μ
- Teplotní závislost hodnot deformačního zpevnění H

Vstupní data pro určení a popis modelu svařovacího zdroje tepla

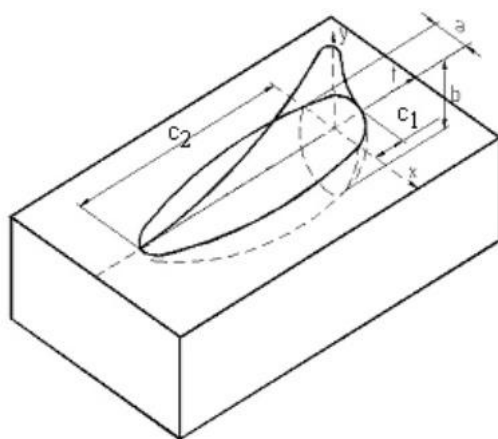
Správný matematický popis tepelného zdroje je pro numerické simulace zásadní. Teplota $T(x,y,z,t)$ je zde pouze funkce souřadnic v prostoru a čase. Přesný popis tvaru a rozměrů svarové lázně a teplotního pole při svařování je zásadní ke správnému určení deformací, zbytkových napětí či struktury materiálu.

V současnosti se již téměř výhradně používají trojrozměrné modely zdroje tepla, protože vykazují nejlepší shodu s reálnými teplotními poli skutečných svařovacích zdrojů. Pro popis obloukových metod svařování obalenou elektrodou, svařování pod tavidlem, nebo svařování MIG, MAG a TIG je téměř výhradně využíván dvou-elipsoidní model zdroje tepla.

Jedná se o kombinaci dvou do sebe zasazených elipsoidů nejlépe popisujících reálný stav. Jednoduchými modifikacemi jej také můžeme použít k popisu všech druhů tavného svařování. Tento zdroj je popisován dvěma rovnicemi, pro každý elipsoid zvlášť. Oproti elipsoidnímu zdroji se zde objevují konstanty f_1 a f_2 , které popisují rozložení intenzity toku energie do materiálu od jednotlivých elipsoidů. Při splnění rovnice (1.1).

$$f_1 + f_2 = 2 \quad (1.1)$$

Zobrazení dvou-elipsoidního zdroje na Obr.1.1 a jeho popis rovnicemi (1.2) a (1.3).



Obr. 1.1: Model dvou-elipsoidního tepelného zdroje /3/

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3} \cdot f_1 \cdot Q}{a \cdot b \cdot c \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{c^2}}, \quad (1.2)$$

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3} \cdot f_2 \cdot Q}{a \cdot b \cdot d \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{d^2}}, \quad (1.3)$$

Poloha zdroje ξ je zde dána rovnicí (1.4).

$$\xi = z_1 - v(\tau - t), \quad (1.4)$$

kde je :

$q(x,y, \xi)$... hustota tepelného toku do materiálu [$W \cdot m^{-3}$]

Q ... celkový výkon zdroje [W]

a,b,c ... parametry natavené oblasti [m]

x,y,z ... souřadnice bodů [m]

f_1, f_2 ... konstanty ovlivňující rozložení intenzity toku energie do materiálu [-]

τ ... celkový čas svařování [s]

t ... okamžitý čas svařování [s]

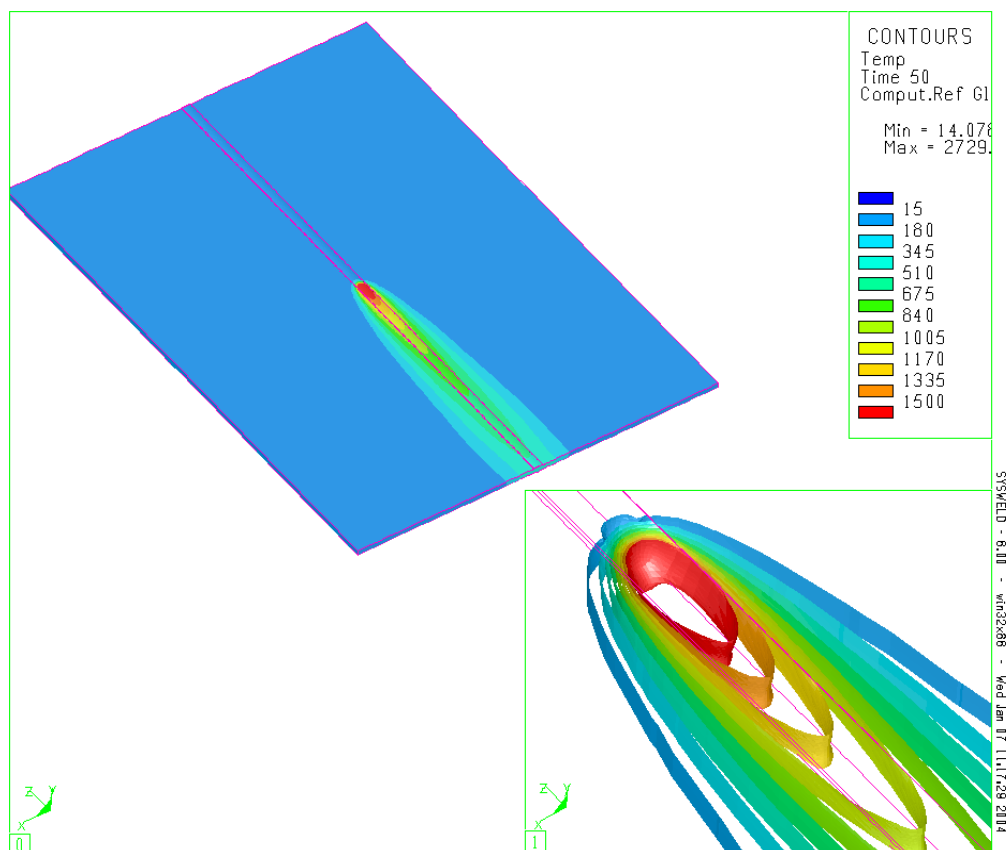
v ... rychlost svařování [$m \cdot s^{-1}$]

ξ ... poloha zdroje v závislosti na svařování [m]

z_k ... souřadnice osy z při ukončení svařování [m]

Při simulacích za použití dvou-elipsoidního modelu je nutné znát velikost natavené oblasti (parametry a,b,c,d). Tyto souřadnice jsou určeny na základě provedených experimentů, kde jsou parametry odečteny z makrovýbrusů. Nemodifikovaný model dvou-elipsoidního zdroje se v praxi používá již od roku 1997, nelze ho však použít jako obecný zdroj tepla u všech případů tavného svařování.

Proto se používá v modifikované podobě, jenž spočívá v úpravě konstant v exponentu. Takto modifikovaný zdroj lze použít u většiny metod tavného svařování, kromě metod s vysokou koncentrací energie (elektronový paprsek, laser, plazma).



Obr.1.2: Simulace působení zdroje tepla při svařování - Sysweld /14/

Vstupní data pro tvorbu prostorového modelu

Prostorové modely mnohem lépe vystihují skutečné podmínky při svařování, než modely rovinné, jsou však limitovány výpočtovým časem. Modely při simulacích jsou tvořeny elementy a uzlovými body, hustota uzlových bodů se odvíjí od požadované přesnosti a podrobnosti analýzy.

Nejhustěji zasíťovaná bude oblast svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti, ve větších vzdálenostech bude hustota uzlových bodů klesat. Je-li však nutné, lze hustěji zasíťovat jakoukoliv oblast modelu svaru, ať už místa upevnění svařovaných dílů nebo prostor okolo připevněného termočlánku.

2 Systém pro monitorování a dokumentaci svarů Weldmonitor

Systém Weldmonitor umožňuje pomocí moderní digitální techniky monitorovat a podrobně dokumentovat proces obloukového svařování a tím zajistit snadnější reprodukovatelnost svarových spojů v co nejvyšší kvalitě.

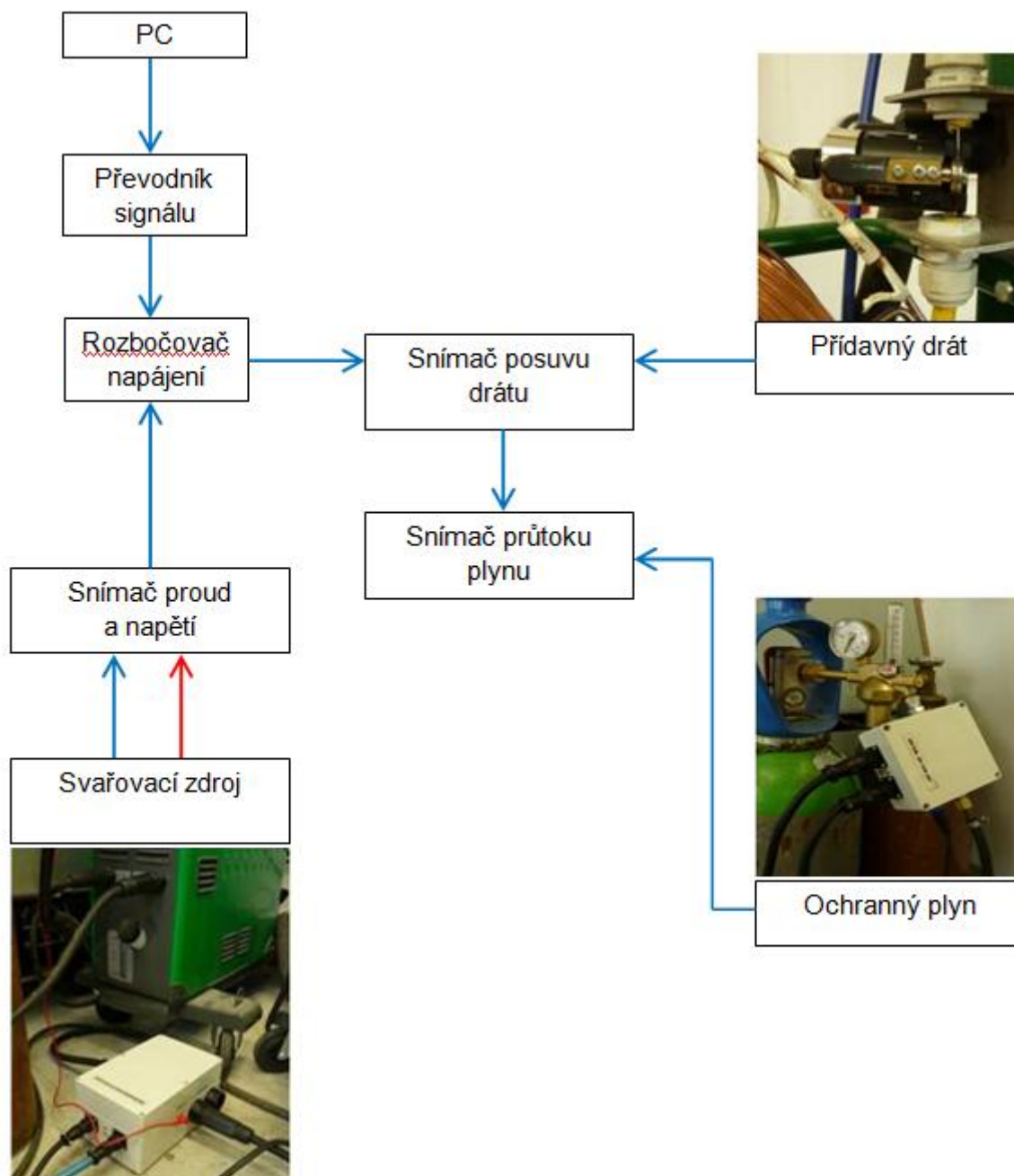
Tento systém zaznamenává, zobrazuje a analyzuje svařovací parametry a tím pomáhá při odhalení chyb svaru, pomáhá odhalovat nedodržení svařovacího postupu díky zobrazení odchylky od tzv. vzorového svaru. Zvyšuje kvalitu výroby a zároveň snižuje výrobní náklady. Vede přehled svářečů a jejich zkoušek, dokumentuje seznam provedených svarů, které dlouhodobě archivuje.

2.1 Weldmonitor hardware

Je to modulární soubor měřících modulů, které je možno připojit na libovolné svařovací zařízení a řídicí PC. V základním provedení měří průběh proudu a napětí (WM-UI), ty měří v reálném čase a zároveň dopočítává vnesené teplo. Dále je možno měřit posuv drátu, průtok plynu, teplotu svařovaného materiálu či atmosférické podmínky svařování. Umožňuje velice rychlý záznam sledovaných veličin a to až do frekvence 12500Hz, což je nezbytná podmínka pro diagnostiku zkratových, impulsních a sprchových svařovacích procesů.



Obr.2.1: Příslušenství svařovacího programu Weldmonitor /7/



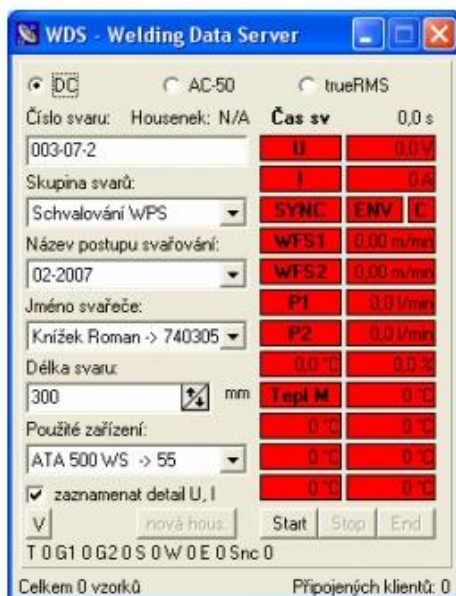
Obr.2.2: Schéma zapojení systému Weldmonitor /6/

2.2 Weldmonitor software

Je řídicím programem pro PC běžící pod operačním systémem Windows. Zajišťuje záznam měřených průběhů, umožňuje zobrazení nasnímaných dat v reálném čase, zahrnuje diagnostiku, dokumentaci a evidenci. Je jej také možno využít pro odhad nákladu a nákladovou optimalizaci svarového spoje.

2.3 Monitorování procesu svařování

Po zapojení jednotlivých modulů ke svařovacímu zdroji a k řídicímu PC, klikneme na ikonu „server WDS (Welding Data Server)“. V okně serveru zadáme číslo svaru a jednotlivé požadované údaje. Po přípravě svářeče nebo svařovacího robota stiskneme na komunikačním modulu tlačítko START.



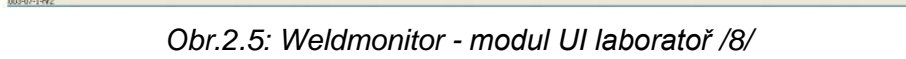
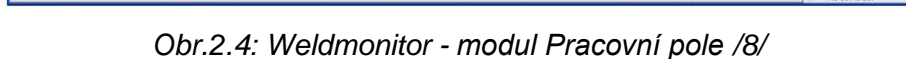
Obr.2.3: Weldmonitor - Komunikační modul monitorování průběhu svařování /8/

V tento okamžik jsou veškerá naměřená a výpočetní data zaznamenávána do centrálních databází programu. Po skončení housenky stiskneme tlačítko STOP a po dokončení samotného svaru stiskneme tlačítko END.

Pro metody MIG, MAG a jim příbuzné metody pracuje systém Weldmonitor s kontrolou nastavených parametrů svařování, pomocí tzv. pracovního bodu v pracovním poli. S ohledem na program Weldmonitor a následně provedené zkoušky svarových spojů byla prokázána závislost proudu a napětí, která je popsána pracovním polem. To je oblast grafu, kde by se měl pohybovat průsečík aktuálního proudu a napětí (pracovní bod).

Pracovní pole je ovlivněno zejména: základním materiálem, ochranným plynem a průměrem svařovacího drátu. Z toho vyplývá velké množství pracovních polí, která jsou v programu názorně popsána a jejich zvolení je pro danou metodu svařování jednoduché a zcela

Průběh svařování rel. vlnkost okoli 9,9%



3 Měření teploty pomocí termočlánků

Základní formou termočlánku je snímač teploty složený ze dvou různých kovových drátů spojených do jednoho bodu. Při zahřívání tohoto spoje zde vzniká napětí v závislosti na teplotě. V průmyslu se používají určité kombinace termočlánekových drátů. Každá z těchto kombinací má svou vlastní závislost výstupního napětí na teplotě. Tyto dvojice drátů různých kovů jsou známy jako typy termočlánků. Jednotlivé typy termočlánků mají určité teplotní rozsahy a vlastnosti, dle kterých jsou více či méně vhodné pro různé aplikace. Typy termočlánků jsou označovány písmenem a přiřazeným barevným kódem.

Tab.3.1: Typy termočlánků /9/

Typ	Kladná větev	Záporná větev	Teplotní rozsah
J	Železo (Fe)	Konstantan (Cu-Ni)	0 až 760°C
K	Chromel (Ni-Cr)	Alumel (Ni-Al)	-200 až 1200°C
T	Měď (Cu)	Konstantan (Cu-Ni)	-200 až 370°C
E	Chromel (Ni-Cr)	Konstantan (Cu-Ni)	-200 až 900°C
N	Nicrosil (Ni-Cr-Si)	Nisil (Ni-Si-Mg)	-200 až 1200°C
R	Pt - 13% Rh	Pt	0 až 1480°C
S	Pt - 10% Rh	Pt	0 až 1480°C
B	Pt - 30% Rh	Pt - 6% Rh	870 až 1700°C

Při výběru termočlánku je potřeba klást důraz na tyto faktory:

- Provozní teplota
- Chemické agresivita pracovního prostředí
- Mechanická ochrana termočlánků
- Odolnost proti opotřebení otěrem
- Požadavky na instalaci (shodnost se stávajícím zařízením)
- Rychlost odezvy měření termočlánku

3.1 Typy termočlánekových spojů

Měřicí spoje termočlánků se dělí do tří typů: nechráněný, uzemněný a izolovaný. Každý z těchto typů má své výhody a nevýhody. Uživatel volí daný typ podle potřeby a vhodnosti použití pro danou aplikaci. Rychlost odezvy při měření je dána časovou konstantou. Časová konstanta je definována jako čas potřebný k tomu, aby sonda za předem daných podmínek dosáhla 63,2% skokové změny teploty. Pro takřka 100% hodnotu skokové změny teploty pak musí sondě postačit pět časových konstant. Čím menší je průměr pláště, tím rychlejší je časová odezva, maximální měřicí teplota je však nižší.



Obr.3.1: Typy termočláňkových spojů; zleva: nechráněný spoj, uzemněný spoj, izolovaný spoj /9/

Nechráněný spoj

Termočlánek u tohoto druhu spoje je vysunut z ochranného pláště a je tak vystaven vlivům okolního prostředí. Tento typ termočláňku se vyznačuje rychlou časovou odezvou měření, musí být však použit pouze v suchém, nekorozivním a netlakovém prostředí.

Uzemněný spoj

Uzemněný typ termočláňkového spoje má termočláňkový drát fyzicky spojen s pláštěm sondy. To má za následek dobrý přestup tepla z vnějšku k termočláňkovému spoji a s tím spojenou poměrně rychlou dobu odezvy.

Izolovaný spoj

U izolované sondy je měřicí spoj oddělen od stěny pláště. Časová konstanta je delší než u uzemněné sondy, toto provedení poskytuje galvanické oddělení termočláňkového spoje./9/



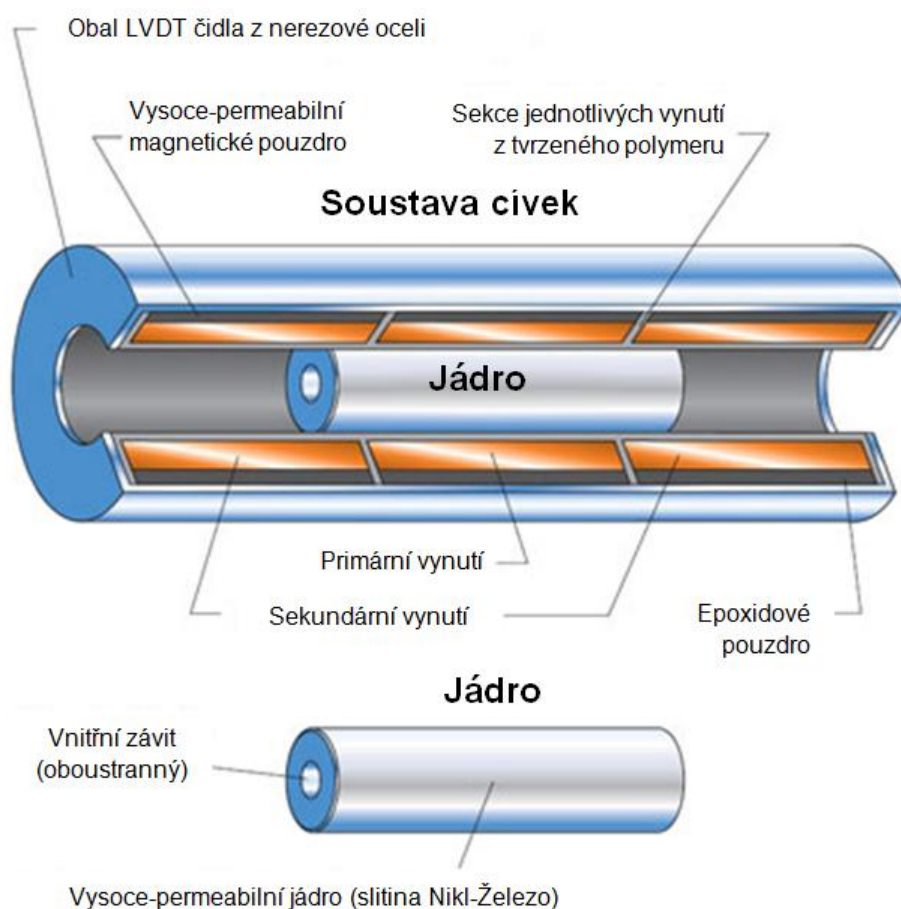
Obr.3.2: Ukázka izolovaného termočláňkového drátu /9/

4 Měření lineárního posuvu pomocí LVDT čidel

4.1 Charakteristika čidla

LVDT (linear variable differential transformer) čidlo, je čidlo sloužící k měření lineárního posuvu, v našem konkrétním případě k měření deformací vznikajících tepelnou dilatací zkušebních vzorků zapříčiněných vneseným teplem při svařování.

LVDT převádí přímočarý pohyb objektu s nímž je ve fyzickém kontaktu na odpovídající elektrický signál. LVDT se vyznačují okamžitou odezvou, možností měřit posuvy s přesností na deseti-tisícinu milimetru, v rozsazích od několika centimetrů do půl metru.

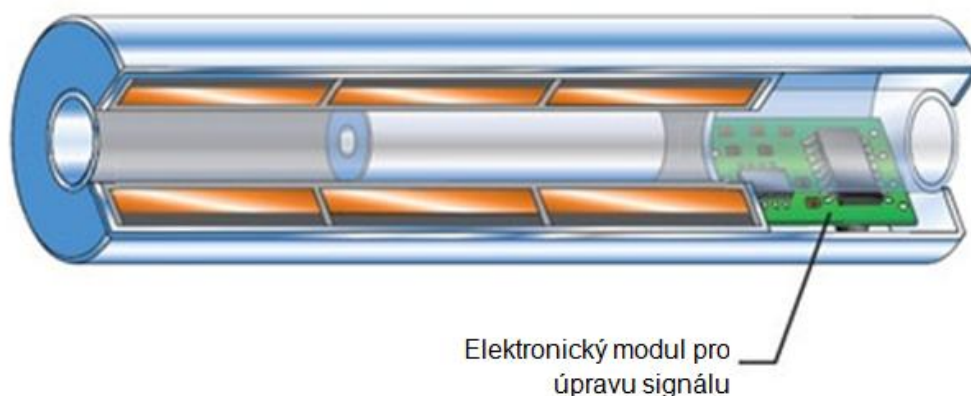


Obr.4.1: Vnitřní soustrojí LVDT čidla /10/

Vnitřní struktura se skládá z cívky primárního vynutí uložené ve středu modulu a páru sekundárních cívek stejného vynutí symetricky uložených po obou stranách primáru. Cívky jsou navinuty na celistvou dutou formu z kompozitního polymeru vyztuženého skelnými vlákny s nízkou tepelnou roztažností, celé tato soustava je uložena v magnetickém obalu s vysokou permeabilitou a zapouzdřena proti vnikání vlhkosti. Tato část sondy je obvykle stacionárním prvkem.

Pohyblivým prvkem je pak samostatné jádro z magneticky měkké slitiny železa a niklu, které se pohybuje axiálně napříč vnitřním otvorem celého modulu. Jádro je pak ve fyzickém kontaktu s objektem jehož pozice se měří.

Během snímání je primární vynutí napájeno střídavým proudem odpovídající amplitudy a frekvence, neboli primárním buzením. Výstupní signál sondy je rozdíl střídavého napětí mezi cívkami sekundáru, které se liší podle pozice jádra v ose modulu. Tento výstupní signál se dále elektronicky převádí na rozdíl stejnosměrného napětí nebo na hodnoty proudu s výhodnějším použitím.



Obr.4.2: Detail modulu pro úpravu výstupního signálu LVDT čidla /10/

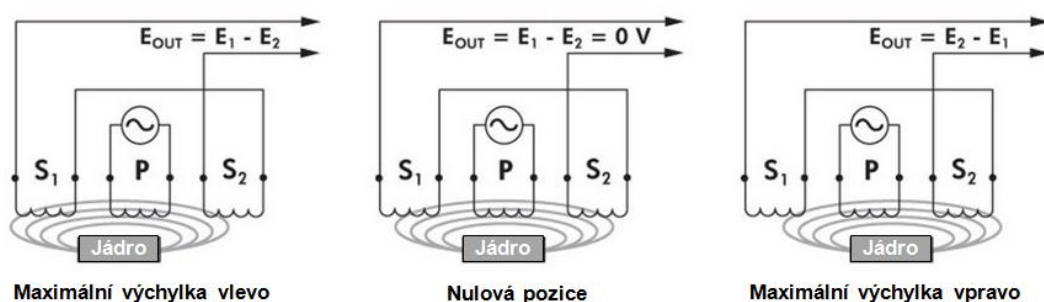


Obr.4.3: Měřicí sonda TMPO 30.005 /13/

4.2 Princip funkce

Na Obr.4.4 je popsána změna napětí v závislosti na různých axiálních polohách LVDT čidla. Primární vinutí LVDT čidla (**P**) je buzeno střídavým proudem s konstantní amplitudou. Změna napětí na sekundárních vinutích **S₁** a **S₂** je pak vyvozena zápornou či kladnou odchylkou od referenční pozice jádra. Pokud se jádro nachází v referenční pozici (nulový bod), tj. ve stejné vzdálenosti od vynutí **S₁** a **S₂**, pak se rovnají i výstupní napětí sekundárních vynutí. Dle vztahu (1.5) je pak rozdíl napětí **E₁** a **E₂** na sekundárních vinutích nulový. Analýzou tohoto výstupního signálu je následně zjištěna i nulová hodnota měřené vzdálenosti.

V případě, že se jádro modulu přesune blíže k vinutí **S₁** než k **S₂**, indukuje se vyšší napětí **E₁**, zatímco napětí **E₂** je sníženo. Následkem toho je výsledný rozdíl napětí popsán vztahem (1.6.). V opačném případě, kdy se jádro nachází blíže k vynutí **S₂**, je indukováno vyšší napětí **E₂** a nižší **E₁**, viz. vztah (1.7).



Obr.4.4: Změny napětí v závislosti na poloze jádra LVDT čidel /10/

$$E_{out} = E_1 - E_2 = 0 \text{ [V]} \quad (1.5.)$$

$$E_{out} = E_1 - E_2 \quad (1.6.)$$

$$E_{out} = E_2 - E_1 \quad (1.7.)$$

kde je:

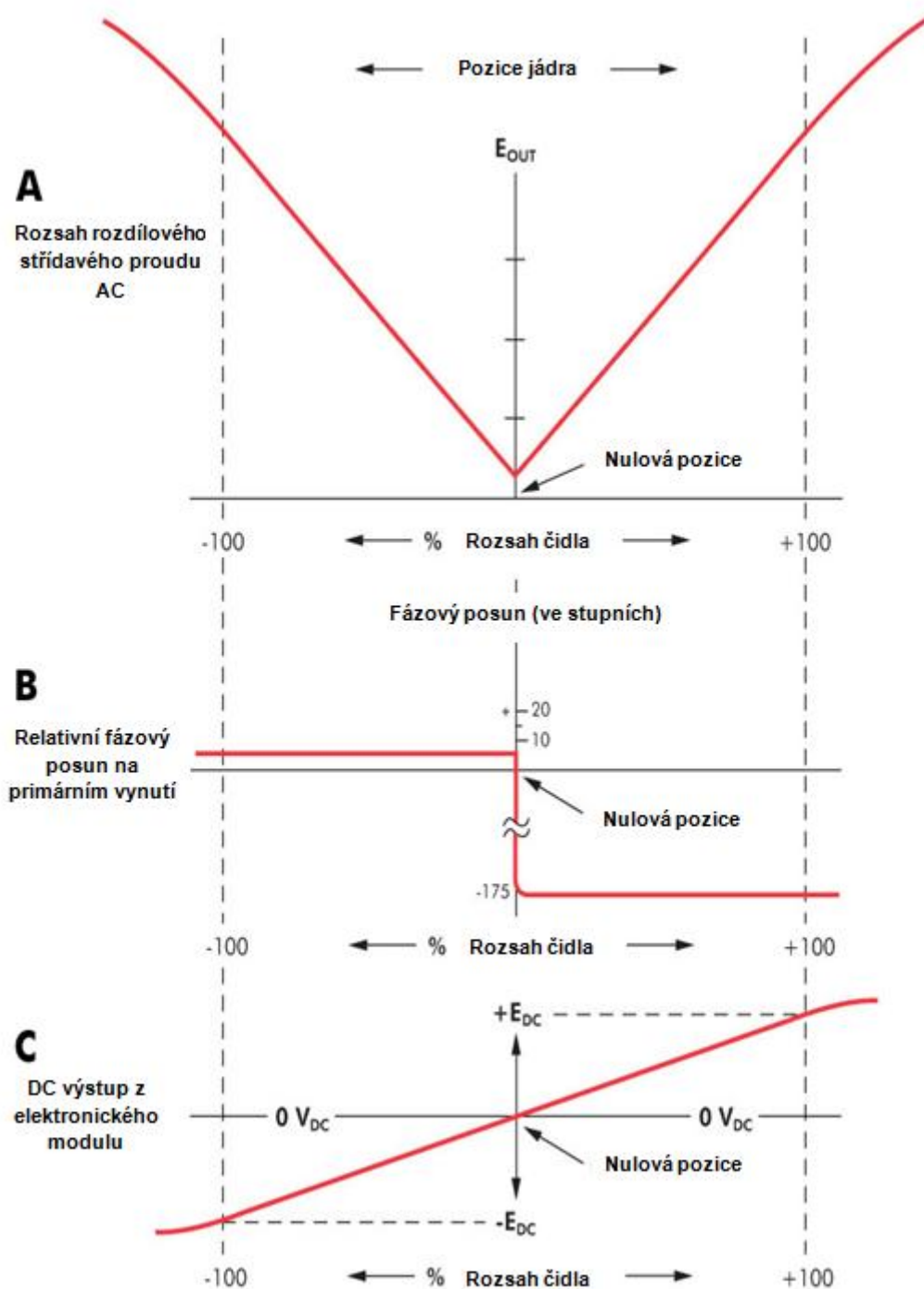
E_{out} ... rozdíl napětí indukovaného na sekund. vinutích [V]

E_1 ... napětí indukované na vinutí S₁ [V]

E_2 ... napětí indukované na vinutí S₂ [V]

Na **Obr.4.5 v grafu A** je patrná změna velikosti výstupního napětí E_{out} v závislosti na pozici jádra. Hodnota maximálního výstupního napětí E_{out} závisí na amplitudě primárního budícího napětí a koeficientu citlivosti konkrétního LVDT čidla, obvykle je však jen několik voltů efektivní hodnoty primárního budícího napětí. Fázový úhel střídavého výstupního napětí E_{out} vztažený k primárnímu budícímu napětí je konstantní až do stavu, kdy střed jádra přechází přes nulový bod, kde se mění skokově o 180° (znázorněno na obrázku **4.5 graf B**).

Tato stoosmdesátistupňová fázová změna je pomocí vhodného elektronického obvodu (**Obr.4.2**) využita, k určení směru pohybu jádra z nulového bodu. Toto je popsáno na obrázku **4.5 graf C**, kde polarita výstupního signálu představuje pozici jádra vůči nulovému bodu. Dále je zde znázorněna vysoká linearita výstupního signálu při použití čidla v předepsaném rozsahu. /10/

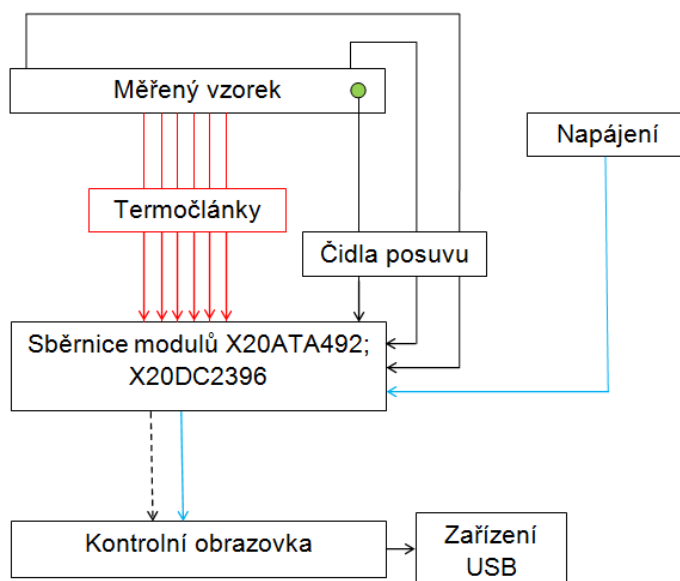


Obr.4.5: Výstupní charakteristiky v závislosti na pozici jádra LVDT čidla /10/

5 Návod k obsluze zařízení DiagWeld V0.12.04.2

Účelem tohoto zařízení je měření dat ze šesti termočlánků za současného sběru informací o posuvech čtyř polohových čidel. Skládá se z modulu X20ATA492, disponuje kompenzací studeného konce pomocí vestavěného snímače PT1000 a umožňuje měření teploty pomocí termočlánků typu **K** (Chromel-Alumel) s nechráněným spojem.

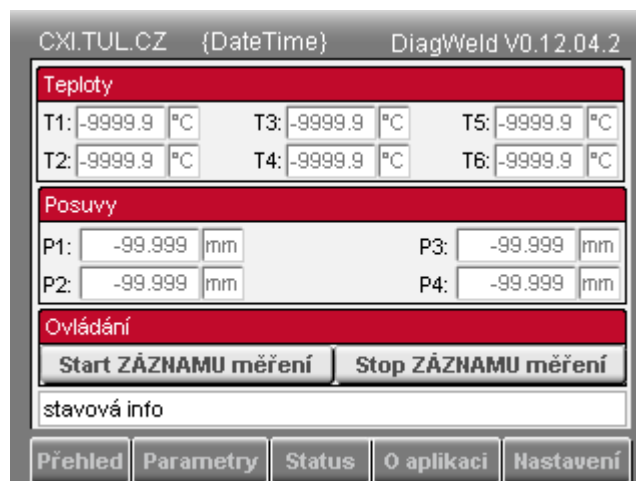
Dále zařízení obsahuje modul X20DC2396, ten slouží k zapojení až čtyř polohových čidel s rozlišením až 5μm na jeden impuls. V současnosti jsou to tři LVDT čidla **TMPO 50**.



Obr.5.1: Schéma zapojení zařízení DiagWeld V0.12.04.2; 6 termočláneků, 3 čidla posuvu.

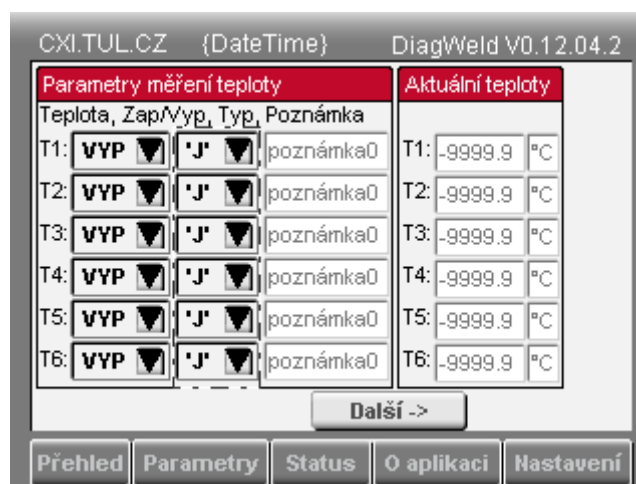
5.1 Ovládání

Po naboťování zařízení se stisknutím tlačítka "Přehled" přepneme na obrazovku přehledu měřících zařízení. Zde se zobrazují aktuální hodnoty měření tepelných a polohových snímačů. Na této obrazovce se spouští a ukončuje vlastní záznam na přenosnou datovou jednotku USB. Nastavení parametrů měření se provádí v záložce "parametry" na dalších třech obrazovkách.



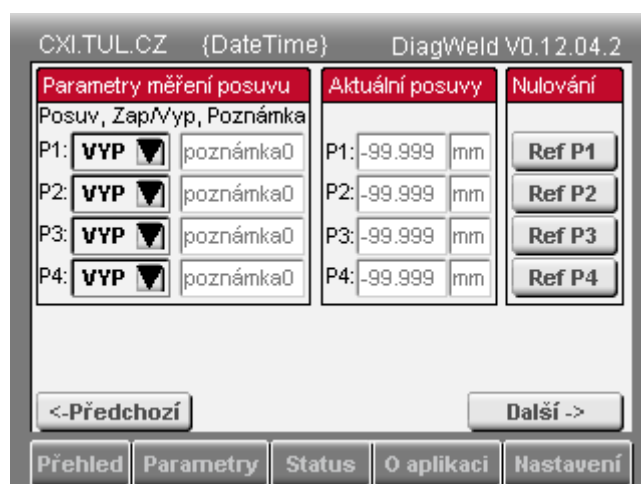
Obr.5.2: Obrazovka přehledu měřených kanálů. /4/

První obrazovka slouží k zapnutí kanálů měření jednotlivých termočlánků. V současné verzi jsou nastaveny na typ K (do 1200°C). Poznámka slouží k popisu měření a může obsahovat až deset znaků. U každého kanálu se zobrazuje jeho aktuální teplota. Pokud není připojen termočlánek nebo pokud je kanál vypnut, pak se zobrazuje naměřená hodnota -9999.9°C. Pokud je termočlánek chybně připojen, potom se ukazuje blikající číslo kanálu „1“ nebo „2“ na modulu X20ATAA492.



Obr.5.3: Obrazovka nastavení měřících kanálů termočlánků /4/

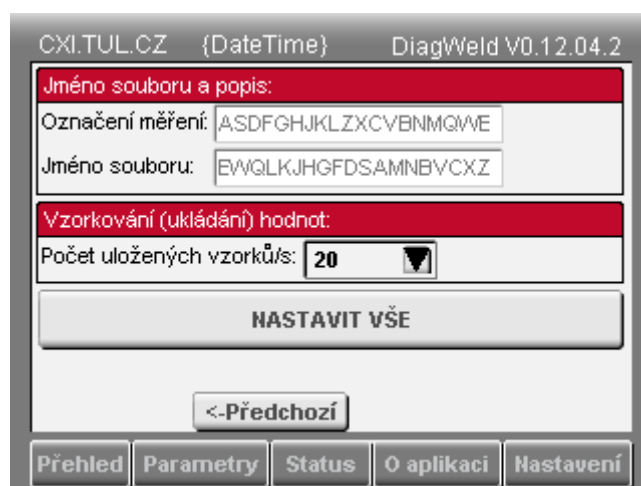
Druhá obrazovka slouží k nastavení měření posuvů. Použití LVDT čidel umožňuje relativní odměřování polohy. Při zapnutí přístroje jsou čítače polohy rovny 0. Tlačítka Ref P1 až Ref P4 slouží k nastavení aktuální měřené polohy rovněž jako 0, tím určují počátek potřebného souřadného systému pro aktuální měření.



Obr.5.4: Obrazovka nastavení měřících kanálů čidel posuvu /4/

Poslední obrazovka je věnována všeobecným společným parametrům. Zde se nastavuje jméno souboru a popisek měření vytvořeného na přenosném zařízení USB. Posledním nastavením je četnost zápisu měřených hodnot s maximální četností zápisu rychlostí dvacet vzorků za sekundu.

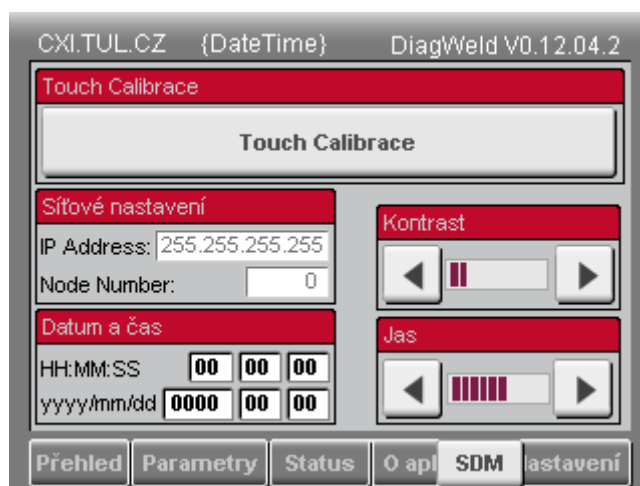
Stisknutím tlačítka "NASTAVIT VŠE" se USB zařízení zapíše hlavička měření s aktuálním nastavením kanálů, popisky měření a dalšími informacemi. Veškerá nová nastavení kanálů jsou aktualizována okamžitě.



Obr.5.5: Obrazovka nastavení obecných parametrů a rychlosti vzorkování /4/

5.2 Zápis na USB

Soubory měření se ukládají ve formátu CSV. Data kanálů jsou uchovávána ve sloupcích. První sloupec obsahuje informaci o čase, do druhého se ukládá index měřeného vzorku pro snadnou tvorbu grafů, následující sloupce opsahují naměřené údaje s teplotami a posuny. Při nepřipojeném termočláunku a zapnutém kanálu se v tabulce zobrazuje údaj "TC odpojen". Pokud není kanál měřen nachází se v tabulce popisek "VYP". /4/



Obr.5.6: Obrazovka nastavení grafiky monitoru /4/

Poslední funkční obrazovkou je obrazovka "Nastavení", kde jsou informace o IP adrese, zde je možno nastavovat jas a kontrast dotykové obrazovky.

6 Experimentální část - Realizace mechanizovaného svařovacího pracoviště určeného k měření teplotních polí a deformací

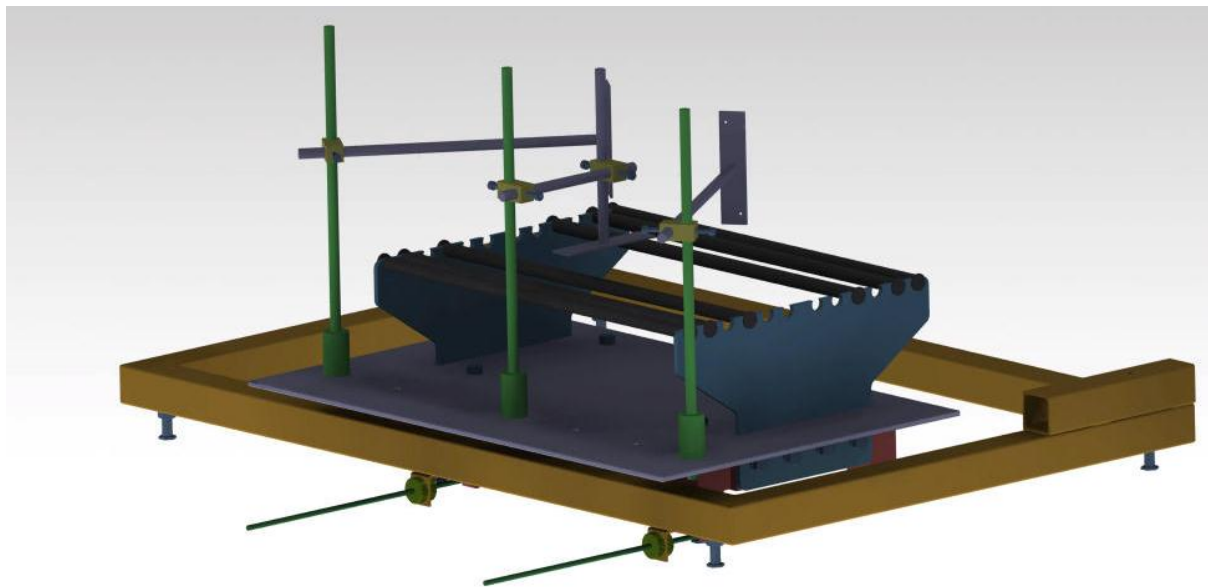
Účelem zde popsaného zařízení je experimentální měření deformací a posuvů zkušebních vzorků při svařování metodami 131 a 135 dle ČSN EN ISO 4063 a následném chladnutí. Vysoké nároky jsou kladeny hlavně na tuhost přípravku při upnutí vzorku a dále na přesně definovaný součinitel přestupu tepla do okolí. Experimentální pracoviště (Příloha: Výkres_sestava1) se skládá, z přípravku pro upnutí (Příloha: Výkres_podsestava1) a z přípravku pro měření posuvů a deformací (Příloha: Výkres_podsestava2).

Přípravek pro upnutí je konstrukčně řešen tak, že umožňuje dostatečně tuhé upnutí a zároveň jednoznačně určení koeficientu přestupu tepla do okolí. Zvolená konstrukce nadále umožňuje snadný přístup měřících čidel a zařízení ke zkušebnímu vzorku. Výhodou tohoto způsobu upnutí je liniový, případně přerušovaný liniový dotyk mezi zkušebním vzorkem a kontaktními částmi přípravku. Polohu zkušebního vzorku je navíc možno modulárně upravovat dle potřeb na umístění měřících sond. Tuhost upnutí lze snadno zvýšit použitím bočnic s větším průměrem otvorů a přidáním odpovídajících, masivnějších kontaktních částí většího průměru (větší tuhosti). Výsledná konstrukce přípravku je situována tak, aby byla kompatibilní

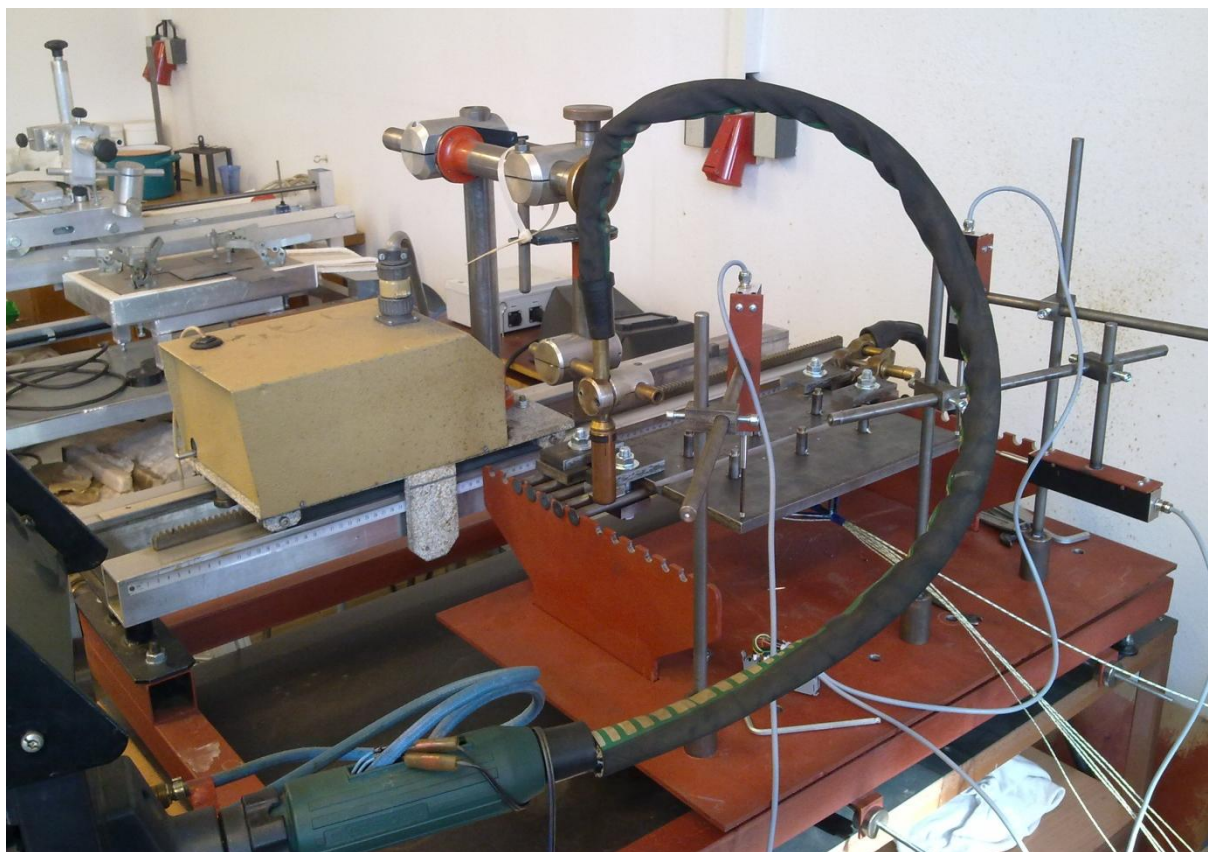
s **přípravkem pro měření posuvů a deformací** při svařování a následném chladnutí vzorku. Uplatnění tohoto přípravku je možné, jak v automatických, poloautomatických svařovacích technologiích, tak i u technologií ručních. V současnosti je tento přípravek součástí poloautomatického svařovacího pracoviště metod 131 a 135 dle ČSN ISO 4063. Toto svařovací pracoviště se dále skládá z lineárního automatu s plynulým nastavením rychlosti svařování, svařovacího zdroje BDH 550 puls syn, monitorovacího systému Weldmonitor a měřícího systému DiagWeld V0. Rozměrově přípravek umožňuje svařovat vzorky dle normy ČSN EN ISO 15614-1, je ho tedy možné využít k získání specifikace svařování WPS, nebo schváleného postupu svařování WPQR.

Přípravek pro měření posuvů a deformací, společně s **přípravkem pro upnutí s přesně definovaným koeficientem přestupu tepla do okolí** tvoří, univerzální měřící pracoviště pro měření všech procesních a technologických vstupních dat pro numerické simulace svařování. S výhodou jsou tak získávány informace o posuvech měřených bodů a deformacích svařovaného vzorku současně se vstupními daty o teplotních polích svařence. Tímto způsobem jsou ke měřeným deformacím přiřazeny aktuální teploty ve sledovaných oblastech.

Konstrukce toho přípravku umožňuje měření posuvů a deformací zkušebního vzorku během svařování a následném chladnutí. Návrh přípravku umožňuje měření v libovolném místě na povrchu svařovaného vzorku. Upínací prvky LVDT čidel zaručují minimálně čtyři stupně volnosti pohybu.

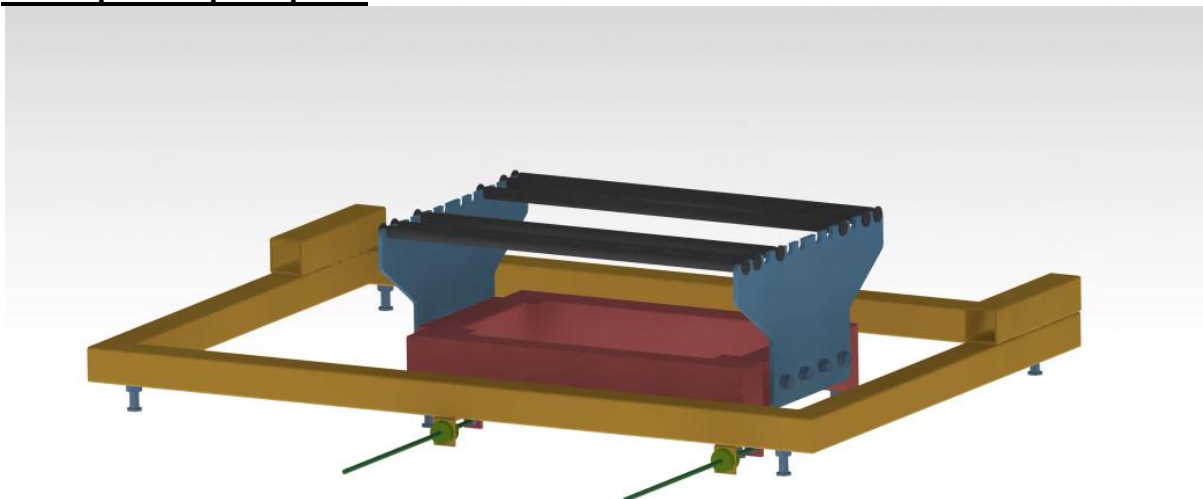


Obr.6.1: Kompletní experimentální pracoviště - Sestava 1 /15/



Obr.6.2: Ukázka svařovacího pracoviště, včetně svař. automatu

6.1 Přípravek pro upnutí



Obr.6.3: Přípravek pro upnutí - Podsestava 1 /15/

Základní rám 1 - Podsestava 1

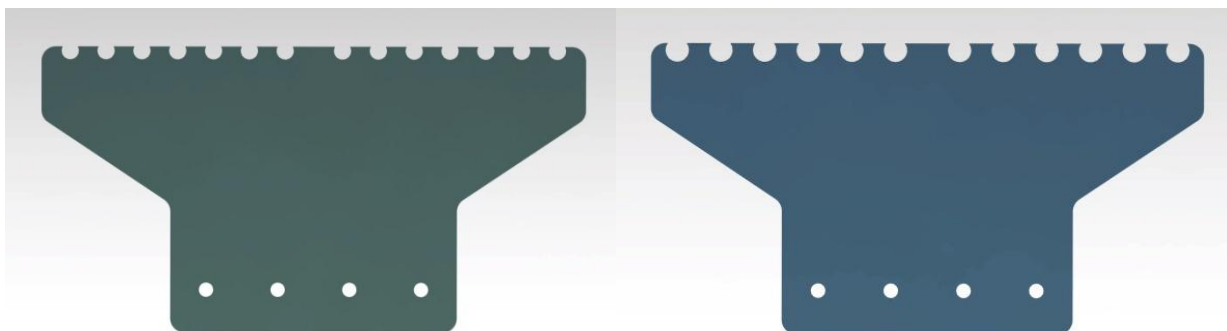
Základní rám 1 (Příloha: Vykres_ram1) slouží jako nosná konstrukce přípravku pro upnutí. Je zhotoven z obdélníkového bezešvého profilu 60x40. Do roviny je ustaven pomocí čtyř stavěcích šroubů M12x60 - 8.8 s kontramatkou, která se opírá o válcovou podložku pro šrouby M12. Na čelní ploše rámu se nacházejí patky s otvory $\varnothing 7\text{mm}$ pro závitové tyče M6x350 pro ustavení vzájemné polohy vůči rámu 2. Na bočních stranách rámu 1 se nacházejí svislé obrobené plochy, každá obsahující čtyři vnitřní závity M12. K těmto plochám jsou pomocí šroubů M12 připevněny bočnice. Horní dosedací plocha rámu je konstruována, jako kompatibilní s přípravkem pro měření posuvů a deformací během svařování, k jehož upnutí slouží čtyři otvory M10 na přivařených plochých tyčích ve vnitřních rozích dosedací plochy. Tato kombinace umožňuje získat při prováděných experimentech všechny potřebné vstupní údaje pro simulační výpočty.



Obr.6.4: Základní rám 1 - Podsestava 1 /15/

Bočnice - Podsestava 1

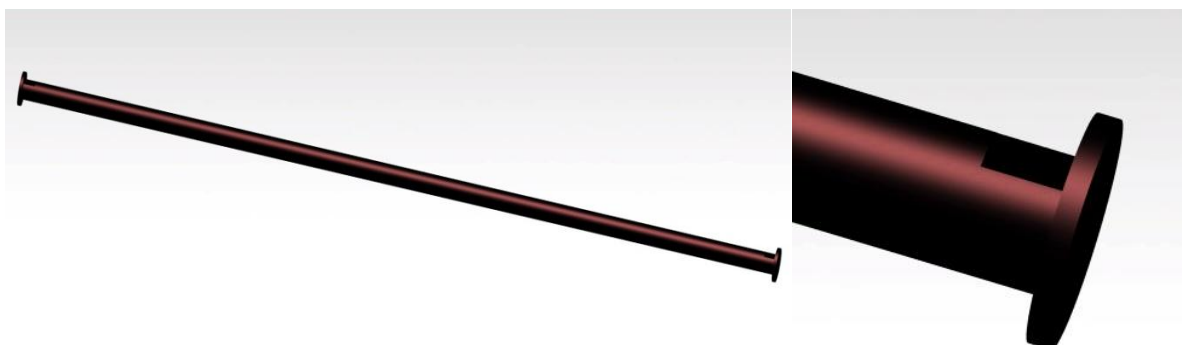
Bočnice přípravku (Příloha: Vykres_bocnice_d12 a Vykres_bocnice_d16) pro upnutí jsou připevněny k rámu 1 pomocí šroubů M12, šrouby jsou proti pootočení zajištěny pružnými podložkami s obdélníkovým průřezem. V horní části bočnic se nacházejí otvory pro vložení kontaktních tyčí Ø12 mm. Při požadované vyšší tuhosti upnutí, je možno vyměnit sadu bočnic za sadu s větším průměrem otvorů v horní části a vložit kontaktní válečky většího průměru (Ø16 mm), tím zvýšíme tuhost výsledné sestavy.



Obr.6.5.a: bočnice s otvory Ø12 mm; Obr.6.5.b: bočnice vyšší tuhosti s otvory Ø16 mm /15/

Kontaktní válečky - Podsestava 1

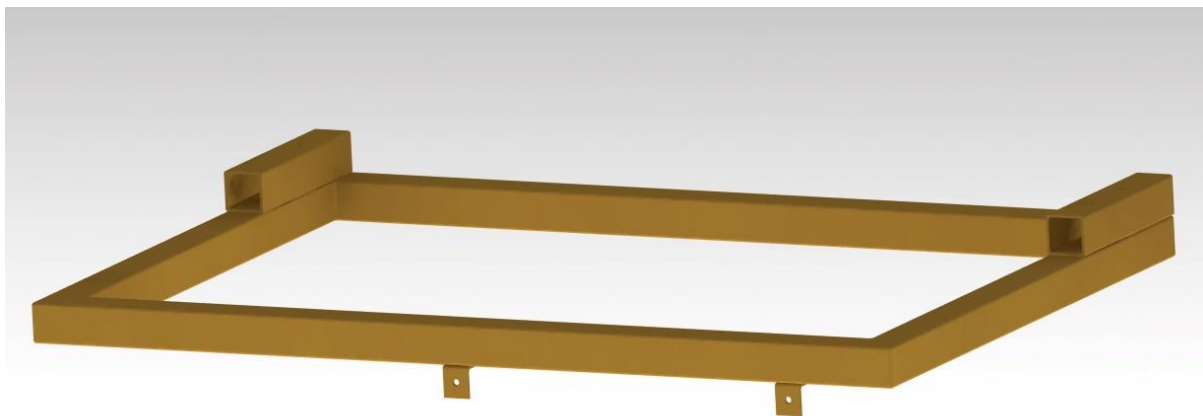
Zkušební vzorek je v kontaktu s tělem přípravku pro upnutí zejména přes kontaktní válečky o průměrech 12 mm (Příloha: Vykres_kont_valecek_d12) či 16 mm (Příloha: Vykres_kont_valecek_d16). Dochází zde pouze k liniovému dotyku a tím je minimalizován přestup tepla konvekcí do těla přípravku. Uvažujeme tedy pouze přestup tepla do okolního prostředí sáláním. Na detailu je znázorněna funkční plocha pro zajištění polohy v bočnici přípravku.



Obr.6.6.a: Kontaktní váleček Ø12 mm; Obr.6.6.b: Detail dosedací plochy kontaktního válečku /15/

Rám 2 - Podsestava 1

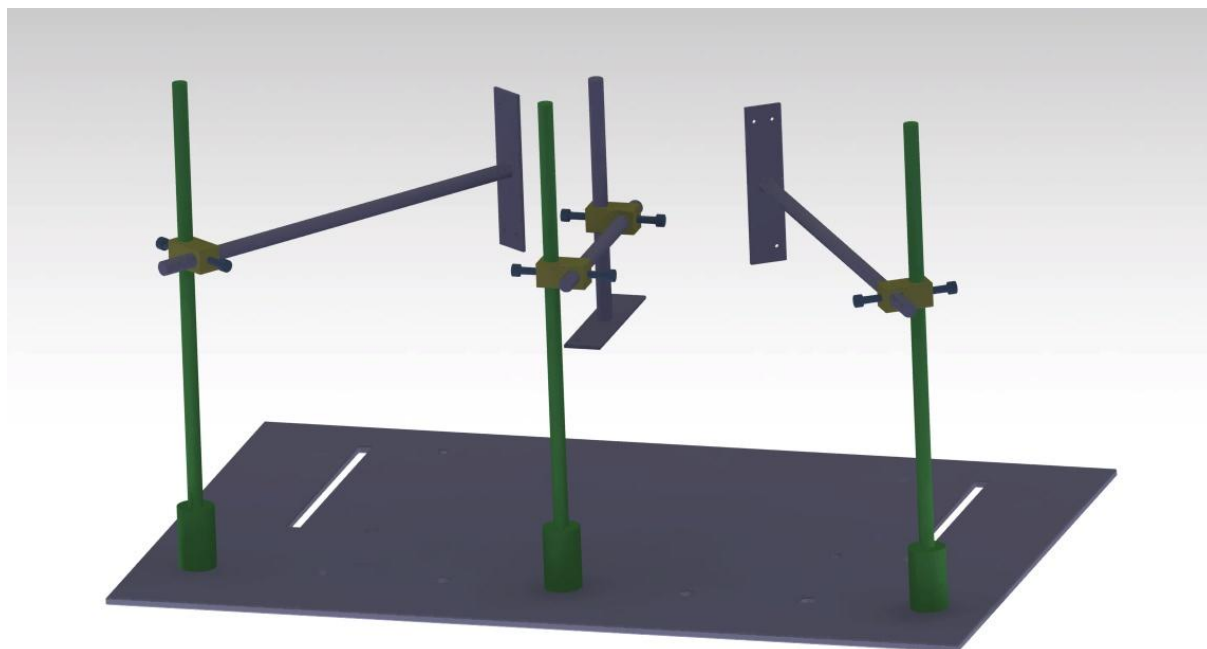
Rám 2 (Příloha: Vykres_ram2) je vnější rám celé konstrukce přípravku pro upnutí, je vyhotoven ze čtvercové bezešvé trubky 45x45. Do roviny je taktéž ustaven čtyřmi šrouby M12x60 - 8.8 s kontramatkou a dosedací podložkou. V zadní části vnějšího rámu se nacházejí čtvercové příchytky pro připojení lineárního svařovacího automatu, v čelní ploše přední části rámu jsou dále umístěny patky s otvory pro závitové tyče M6x350, kterými je pomocí rýhovaných matic (Příloha: Vykres_rahovana_matic) dosaženo vyrovnaní rovnoběžné osy hlavního těla přípravku (rámu 1).



Obr.6.7: Vnější rám přípravku pro upnutí - Podsestava 1 /15/

6.2 Přípravek pro měření posuvů a deformací

Přípravek je osazen třemi LVDT čidly určených k měření příčných, podélných a úhlových deformací. Čidla jsou připojena k modulům vzdálených vstupů a výstupů, které plní funkci převodníků. Jednotlivé moduly vzdálených vstupů a výstupů jsou komunikační sběrnici připojeny k řídicímu počítači. Nově vytvořený software v počítači umožňuje volbu funkcí jako je například definování nulové polohy jednotlivých čidel, nebo frekvence záznamu čidel. Celý systém je navržen tak, aby odolával elektrickým a magnetickým vlivům svařovacího oblouku, ale také například vlivu vysokofrekvenčního zapalování oblouku u metody TIG. Získané záznamy jsou ukládány ve formě datového souboru, podle předem navolené struktury. Velkou výhodou je také možnost synchronního měření teplotních a deformačních polí tímto systémem, což je z hlediska verifikace simulačních výpočtů velice výhodné.



Obr.6.8: Přípravek pro měření posuvů a deformací - Podsestava 2 /15/

Držáky měřících zařízení - Podsestava 2

Držáky měřících čidel se skládají z hlavní vodící tyče průměru 12mm (Příloha: Vykres_stojan), která je ve spodní části opatřena válcovým rozšířením na průměr 30mm pro lepší stabilitu stojanu. Pro uchycení hlavní vodící tyče k základní desce je spodní část tyče opatřena závitem. Připojení stojanu je pak vyvozeno matkou M12, která je zajištěna příslušnou pojistnou podložkou.

Pro pohyb po svislé ose stojanu je zde umístěna svorka (Příloha: Vykres_stojan_svorka), kterou lze pomocí šroubu M6 zajistit v libovolné výškové poloze a úhlu vůči svislé ose.

Pohyb ve vodorovné ose je zaručen horizontálním ramenem (Příloha: Vykres_stojan_rameno), konstruovaným pro montáž LVDT čidla. Rameno prochází primární svorkou a jeho polohu a úhel natočení lze taktéž zajistit pomocí šroubu M6. Tohoto typu

konstrukce je využito při měření úhlových deformací svařovaného vzorku.

Pro měření příčných a podélných deformací je využito konstrukce držáku se sekundární svorkou a pomocným příčným čepem (Příloha: Vykres_spojovací_cep). Nosné rameno LVDT čidla je potom zkráceno (Příloha: Vykres_stojan_rameno_zkr). Tato konstrukce umožňuje LVDT čidlu zaujmout libovolnou horizontální polohu vůči svařovanému vzorku.

Základní deska - Podsestava 2

Nosnou konstrukci přípravku pro měření posuvů a deformací tvoří základní deska (Příloha: Vykres_pracovni_deska) z plechu tloušťky 6mm. Kompatibilitu s přípravkem pro upnutí zaručují čtyři otvory pro šrouby M10. Pro snadnou montáž bočnic přípravku s přesně definovaným přestupem tepla do okolí jsou v základní desce vyhotoveny dva otvory obdélníkového tvaru. Poblíž čelní části základové desky se pak nachází sada otvorů průměru 12mm pro montáž držáků LVDT čidel.



Obr.6.9: Základní deska přípravku pro měření posuvů a deformací - Sestava 2 /15/

7 Prokázání funkčnosti měřicího zařízení - Třivrstvý zkušební tupý svar

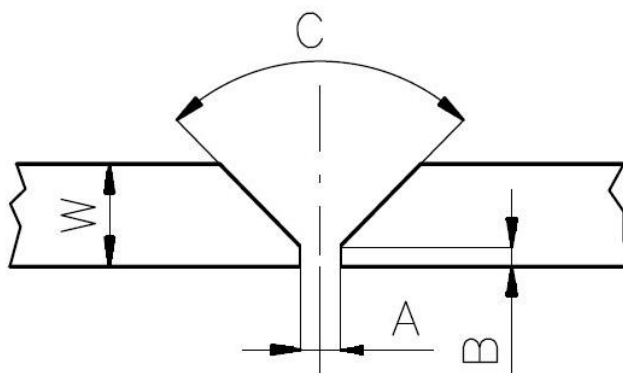
Pro prokázání funkčnosti experimentálního svařovacího zařízení byl použit svařovací zdroj **BDH 550 Puls Syn** společnosti Fronius. Pohyb svařovací hubice byl zajištěn pomocí lineárního svařovacího automatu. Vlastní svařování probíhalo metodou GMAW (Gas metal arc welding), za použití přídatného materiálu ve formě drátu o průměru 1,2 mm a typu OK Autrod 12.51. Místo svaru bylo chráněno atmosférou směsného plynu Ar/CO₂ o poměru 82/18. Zkušební vzorek byl vyhotoven z ploché tyče válcované za tepla, o rozměrech 120x12mm. Materiál vzorku je S235J2G3, jehož chemické složení je zaručeno atestem a popsáno v Tab.7.1.

Tab.7.1: Chemické složení zkušebního vzorku dle atestu /12/

C	Mn	Si	P	S	N ₂	Cu	Ni	Cr	Mo
0,130	0,420	0,195	0,014	0,013	0,006	0,090	0,030	0,050	0,006
V	Al	B	Ti	Nb	As	Sn	Ca	Cekv	
0,000	0,017	0,000	0,000	0,000	0,004	0,006	0,002	0,221	

7.1 Příprava měřicího pracoviště a zkušebního vzorku

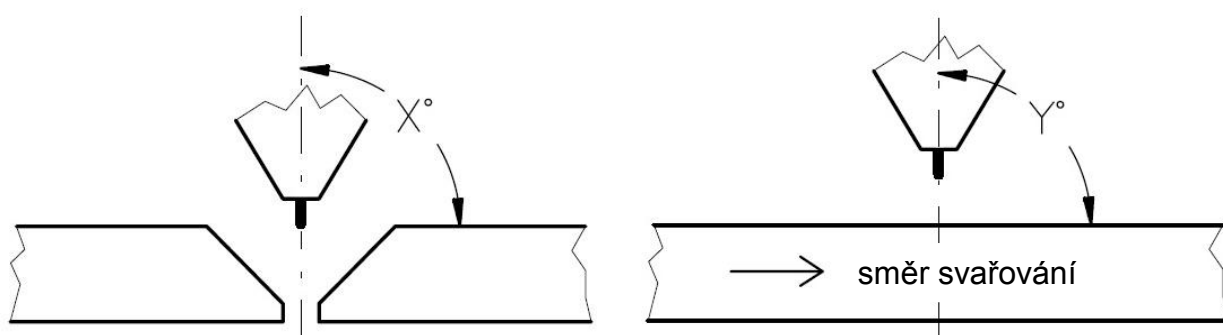
Velikost a geometrie svařovaných vzorků vychází z normy ČSN EN ISO 15614-1 a mohl tak být využit k získání specifikace svařování WPS, nebo schváleného postupu svařování WPQR. Svařovací plochy byly připraveny frézováním. Rozměry desek polotovaru jsou 345x119x12 mm. Svarová mezera A: viz. **Způsob stehování svarových desek** je popsán níže, velikost otupení B je 1,5 mm, úhel rozevření C je roven 60°, tloušťka materiálu W je pak 12 mm.



Obr.7.1 Schéma geometrie a rozměrů svarových ploch /12/

Nastavení geometrie hubice hořáku

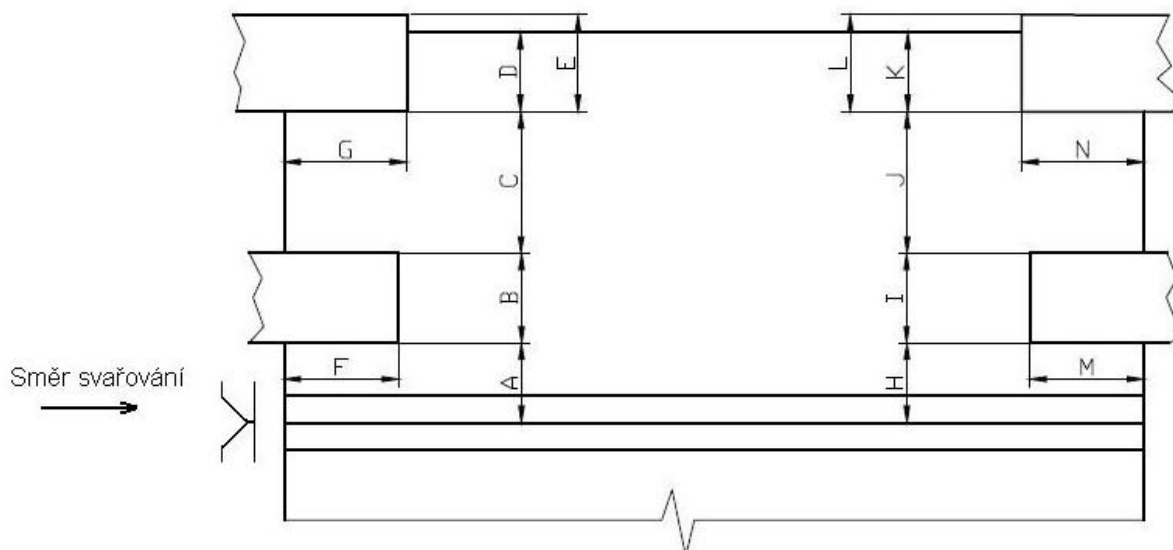
Hubice svařovacího hořáku byla nastavena ve směru kolmém na směr svařování pod úhlem $X = 90^\circ$ a ve směru svařování pod úhlem $Y = 90^\circ$.



Obr.7.2.a: Schéma nastavení hořáku v kolmém směru na směr svařování;
Obr.7.2.b: Schéma nastavení hořáku ve směru svařování /12/

Způsob upnutí svařovaných desek:

Z hlediska numerických simulací je důležité dostatečně tuhé upnutí, s přesně definovaným přestupem tepla do okolí. Vzorek je v přípravku upnut na čtyřech místech s pomocí plošného dotyku s upínkou, dostatečné upnutí je zaručeno za pomoci upínkových šroubů.



Obr.7.3 Schematické naznačení míst upnutí a míst dotyku svarku s přípravkem (včetně rozměrů od počátku a osy svaru) /12/

Rozměry při upnutí:

Rozměr A = 23,0 mm
Rozměr B = 33,5 mm
Rozměr C = 34,5 mm
Rozměr D = 28,0 mm
Rozměr E = 44,0 mm

Rozměr F = 29,5 mm
Rozměr G = 27,3 mm
Rozměr H = 21,0 mm
Rozměr I = 33,5 mm
Rozměr J = 35,0 mm

Rozměr K = 29,5 mm
Rozměr L = 44,0 mm
Rozměr M = 25,5 mm
Rozměr N = 34,5 mm "

Způsob stehování svařovaných desek

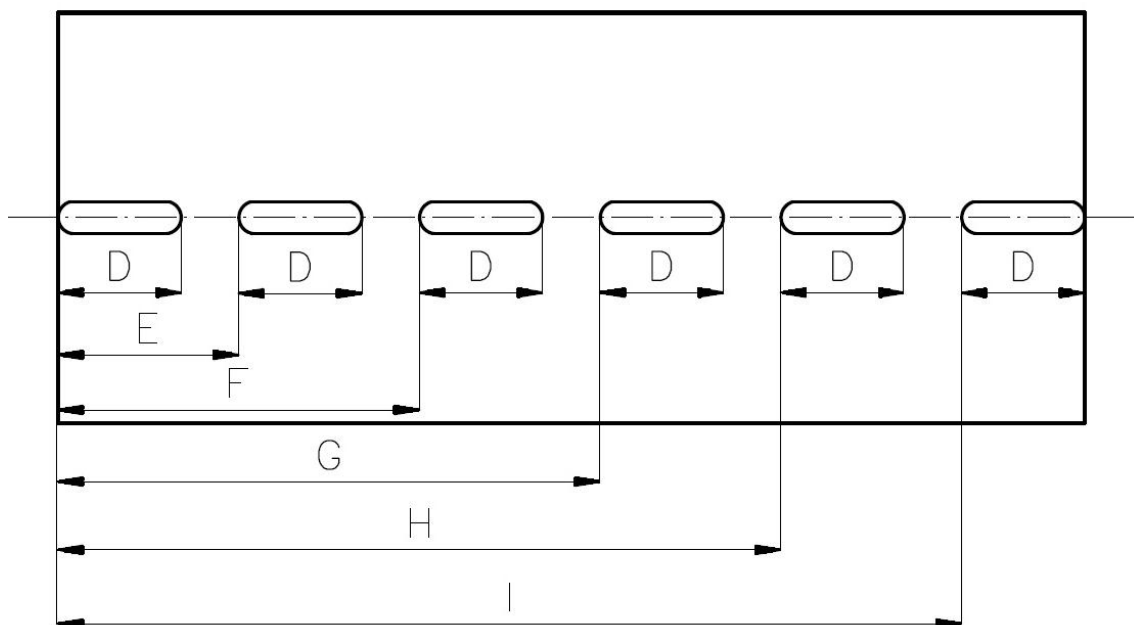
Šířka svarové mezery pro náš konkrétní vzorek je zajištěna čtyřmi stehy (Obr. 7.4), pro delší vzorky může být až šest stehů, dle schématu (Obr. 7.5).



Obr.7.4: Ukázka stehování zkušebního vzorku (spodní strana) /12/

Geometrické rozměry stehů:

1 steh – délka D:	15,8 mm
2 steh – rozměr E:	113 mm
2 steh – délka D:	13,6 mm
3 steh – rozměr F:	224,7 mm
3 steh – délka D:	10,3 mm
4 steh – rozměr G:	334,3 mm
4 steh – délka D:	10,6 mm:



Obr.7.5: Schematické naznačení umístění steh, kótováno od počátku svaru /12/

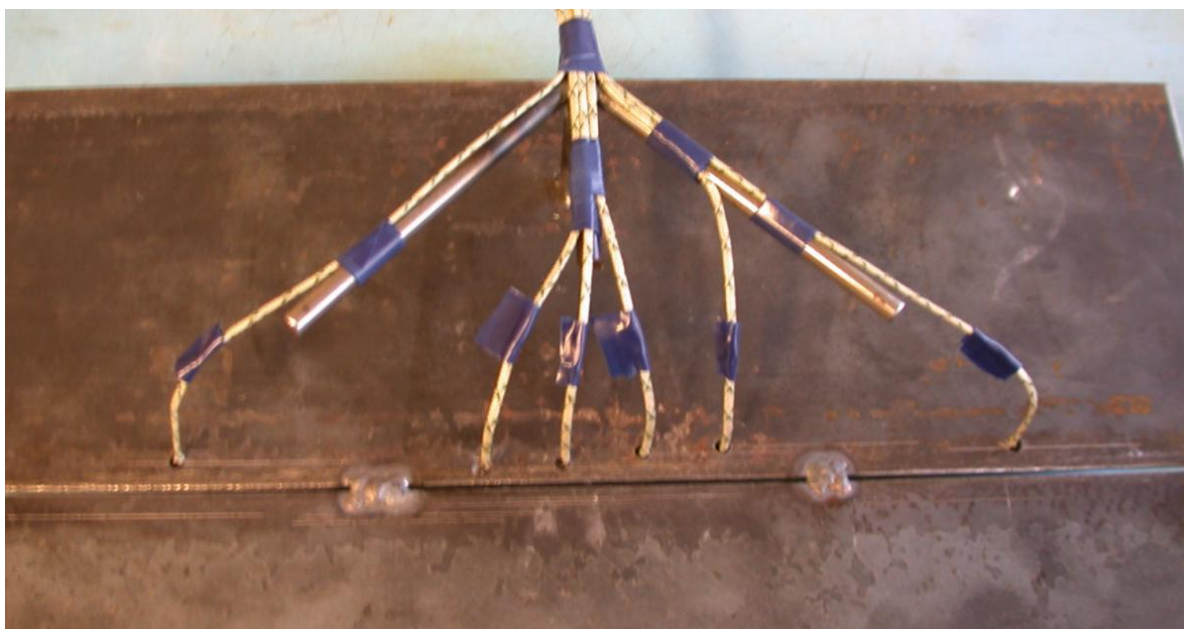
Šířka svarové mezery

Začátek stehu č. 1: není
Začátek stehu č. 2: **1,41 mm**
Začátek stehu č. 3: **1,51 mm**
Začátek stehu č. 4: **1,66 mm**

Konec stehu č. 1: **1,21 mm**
Konec stehu č. 2: **1,48 mm**
Konec stehu č. 3: **1,56 mm**
Konec stehu č. 4: není

Způsob umístění termočlánků na svařovaných deskách

Termočlánky jsou ve zkušebním vzorku (Příloha: Vykres_zkusebni_vzorek) připevněny kondenzátorový přivařením. Z důvodu dokumentace teplotních polí byly termočlánky umístěny do různých hloubek, popsanych v tabulce 7.2, schematicky znázorněných na Obr. 7.7. V našem konkrétním případě byly použity termočlánky typu K do 1200 °C (viz. Tab.3.1).

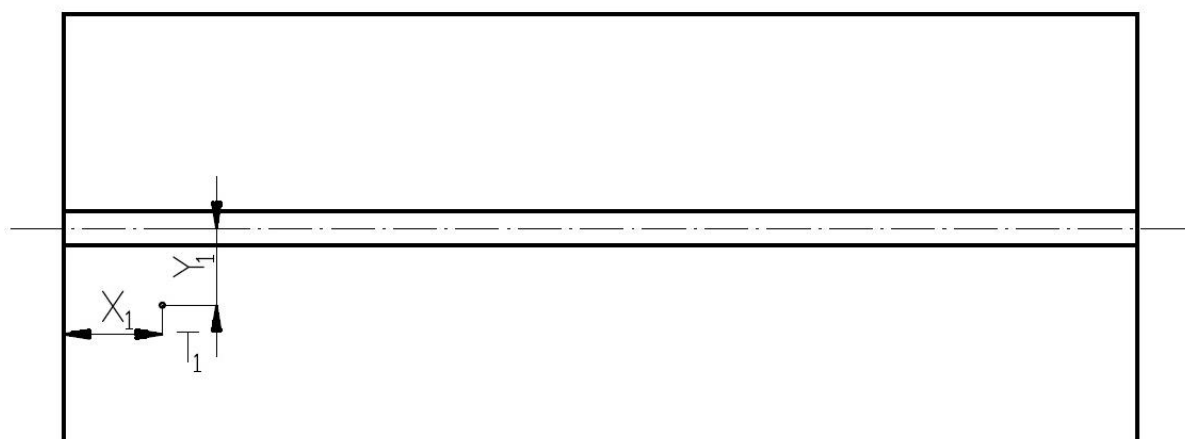


Obr.7.6: Znázornění připevnění termočlánku ve vzorku (zdola) /12/

Pozn.: Ypsilonová souřadnice je uvedena od osy svaru.

Tab.7.2: Geometrické umístění – ypsilonová souřadnice je uvedena od osy svaru /12/

	x [mm]	y [mm]	hloubka [mm]	umístění
Termočlánek T1	70	6,9	6	zdola
Termočlánek T2	145	4,0	2	zdola
Termočlánek T3	165	5,6	4	zdola
Termočlánek T4	185	7,4	7	zdola
Termočlánek T5	205	8,4	10	zdola
Termočlánek T6	280	6,8	6	zdola



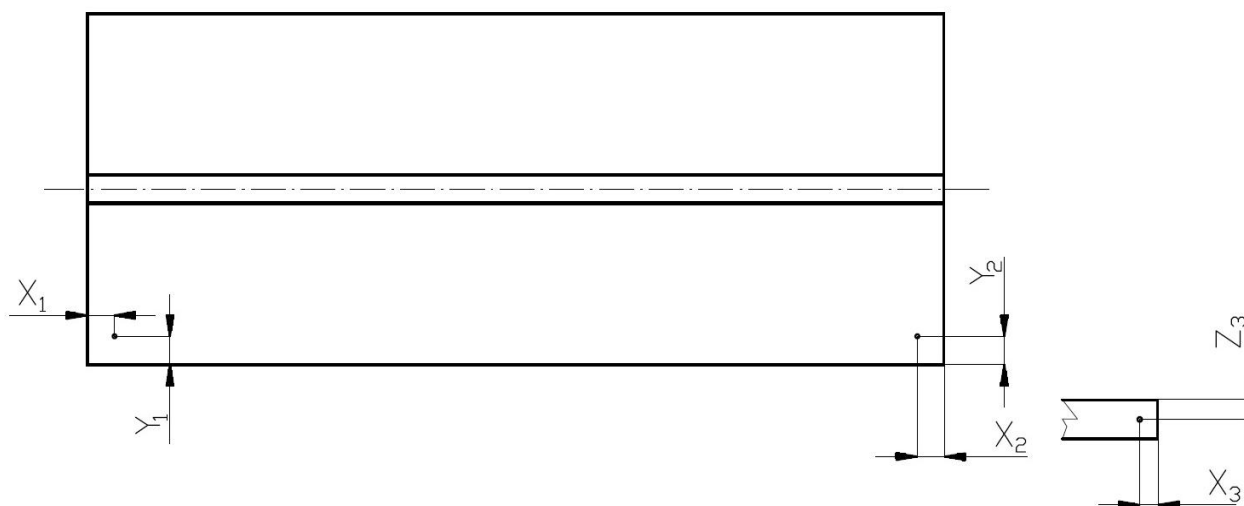
Obr.7.7: Schematické znázornění umístění termočlánků /12/

Způsob umístění polohových čidel na svařovaných deskách:

V průběhu experimentu jsme schopni pomocí LVDT snímače č.3 a č.2 měřit úhlové deformace, pomocí LVDT čidla č.1 umístěného ve vodorovném směru je možno měřit příčné či podélné deformace. Geometrické umístění LVDT snímačů je popsán v Tab.7.3 dle schématu znázorněného na Obr.7.8.

Tab.7.3: Poloha LVDT snímačů při měření /12/

LVDT snímač č.3	$x_1 = 12,7 \text{ mm}$	$y_1 = 10,3 \text{ mm}$	$z_1 = 0,0 \text{ mm}$	směr měření: osa z
LVDT snímač č.2	$x_2 = 10,1 \text{ mm}$	$y_2 = 9,3 \text{ mm}$	$z_2 = 0,0 \text{ mm}$	směr měření: osa z
LVDT snímač č.1	$x_3 = 8,3 \text{ mm}$	$y_3 = 0,0 \text{ mm}$	$z_3 = -5,5 \text{ mm}$	směr měření: osa y



Obr.7.8: Schematické znázornění umístění polohových čidel /12/

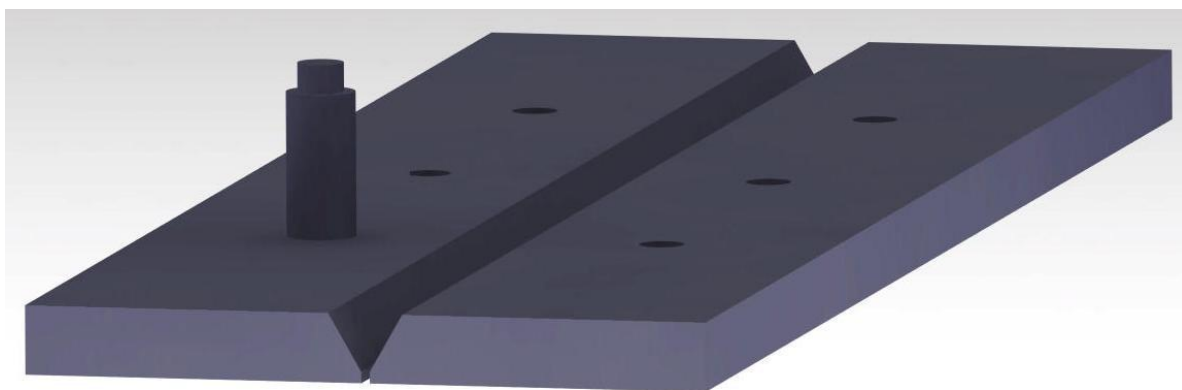
Způsob umístění pomocných měřících návarků na svařovaných deskách

Zkušební vzorek se skládá z dvou plochých tyčí o rozměrech: 120x12x345 mm, jak je zmíněno výše, chemické složení materiálu vzorku udává tab.7.1. Geometrie svařovaných ploch je upravena frézováním a popsána na Obr.7.1.

Ploché tyče vzorku jsou k sobě přivařeny pomocí stehů popsanych na Obr.7.5. Umístění termočlánků pro měření teplotních polí je znázorněn na Obr. 7.7. Polohy LVDT čidel pro měření deformací popisuje Obr.7.8. Na Obr.7.11 je následně znázorněno umístění pomocných měřících návarků (Obr.7.10).

Návarky (Příloha: Vykres_navrek) a kontrolní otvory slouží k měření kontrolních rozměrů před a po svařování. Kontrolní rozměry jsou znázorněny na Obr.7.12 a uvedeny v Tab.7.4, odchylky kontrolních rozměrů jsou nadále uvedeny v Tab.7.5.

Návarků je šest, jejich měřený průměr je 12mm a ke vzorku jsou přibodovány metodou MAG. Kontrolních otvorů je také šest a mají průměr 5mm.



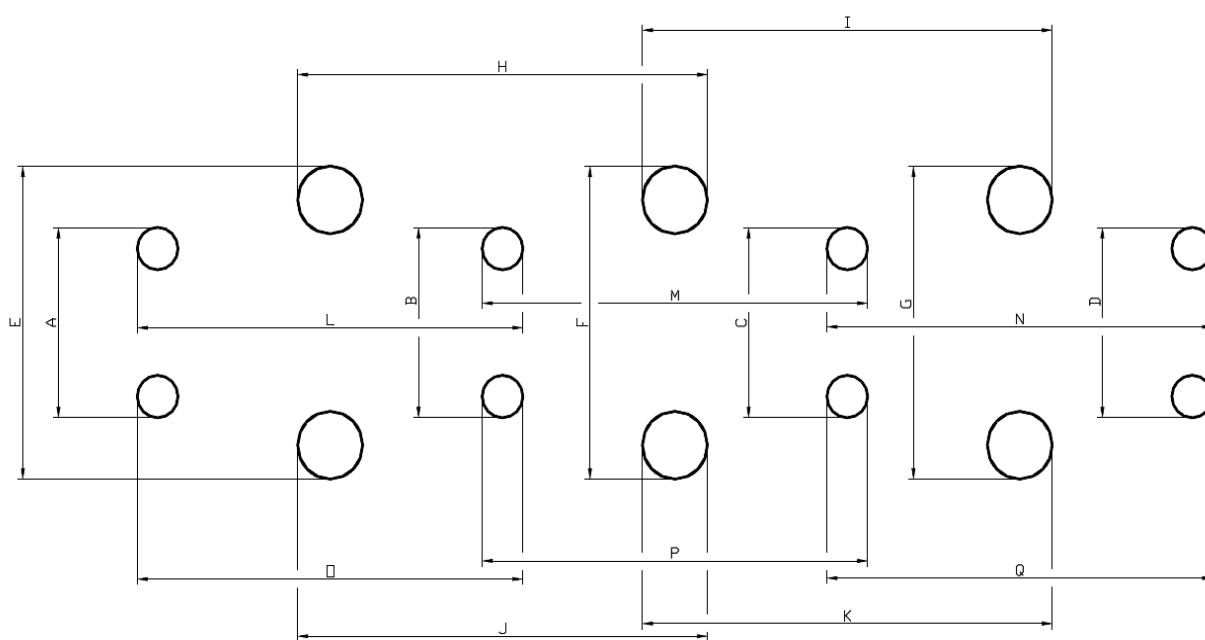
Obr.7.9: Vzorek pro zkušební svary s ukázkou návarku /15/



Obr.7.10: Návarek pro měření kontrolních rozměrů /15/



Obr.7.11: Umístění návarků a kontrolních otvorů ve svař. deskách /12/



Obr.7.12: Schematické znázornění umístění návarků (včetně rozměrů) /12/

Tab.7.4: Kontrolní rozměry deformací svařence /12/

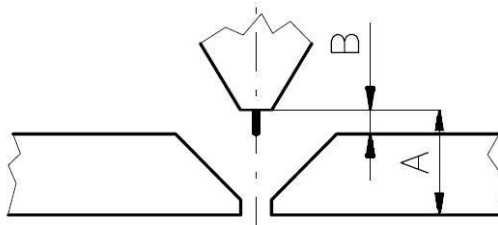
Kontrolní rozměry deformací svařence				
Definovaný rozměr	Rozměr před svařováním	Rozměr po první housence	Rozměr po druhé housence	Rozměr po třetí housence
A	47,63	46,94	46,54	46,20
B	47,78	46,94	46,77	46,39
C	47,95	47,26	47,08	46,60
D	47,98	47,45	47,27	46,94
E	79,93	79,40	78,48	77,33
F	80,37	79,77	78,97	77,95
G	79,76	79,08	78,33	77,36
H	107,87	107,75	107,9	107,92
I	108,11	108,17	108,24	108,24
J	107,40	107,40	107,5	107,49
K	107,65	107,63	107,73	107,75
L	90,10	90,09	89,95	89,92
M	90,0	89,96	89,93	89,99
N	89,85	90,00	89,70	90,00
O	90,03	89,87	89,94	89,85
P	90,05	89,99	90,08	90,05
Q	90,04	89,96	89,90	90,09

Tab.7.5: Odchytky kontrolních rozměrů /12/

Odchytky deformací na kontrolních rozměrech				
Definovaný rozměr	Odchytky před svařováním	Odchytky po první housence	Odchytky po druhé housence	Odchytky po třetí housence
A	0,00	0,69	1,09	1,43
B	0,00	0,84	1,01	1,39
C	0,00	0,69	0,87	1,35
D	0,00	0,53	0,71	1,04
E	0,00	0,53	1,45	2,6
F	0,00	0,60	1,40	2,42
G	0,00	0,68	1,43	2,40
H	0,00	0,12	-0,03	-0,05
I	0,00	-0,06	-0,13	-0,13
J	0,00	0,00	-0,10	-0,09
K	0,00	0,02	-0,08	-0,10
L	0,00	0,01	0,15	0,18
M	0,00	0,04	0,07	0,01
N	0,00	-0,15	0,15	-0,15
O	0,00	0,16	0,09	0,18
P	0,00	0,06	-0,03	0,00
Q	0,00	0,08	0,14	-0,05

7.2 Postup svařování a svařovací parametry při vlastním experimentu

Během svařování je velice důležitá vzdálenost kontaktní špičky (rozměr A na Obr.7.13). Pro přenos materiálu zkratovým přenosem se určuje podle vzorce (1.5), v našem případě pro drát průměru 1.2mm. Při přenosu materiálu sprchovým procesem je vzdálenost dána vzorcem (1.6).



Obr.7.13: Schéma vzdálenosti kontaktní špičky - Housenka 1 /12/

$$A = (10 \times d) + 1 \quad (1.5)$$

$$A = (10 \times d) + 3 \quad (1.6)$$

$$Q_c = \frac{U \times I \times \eta}{v} \quad (1.7)$$

kde je:

d ... průměr drátu [mm]

Q_c ... hodnota celkového vneseného tepla [kJ.cm^{-1}]

U ... napětí svařovacího proudu [V]

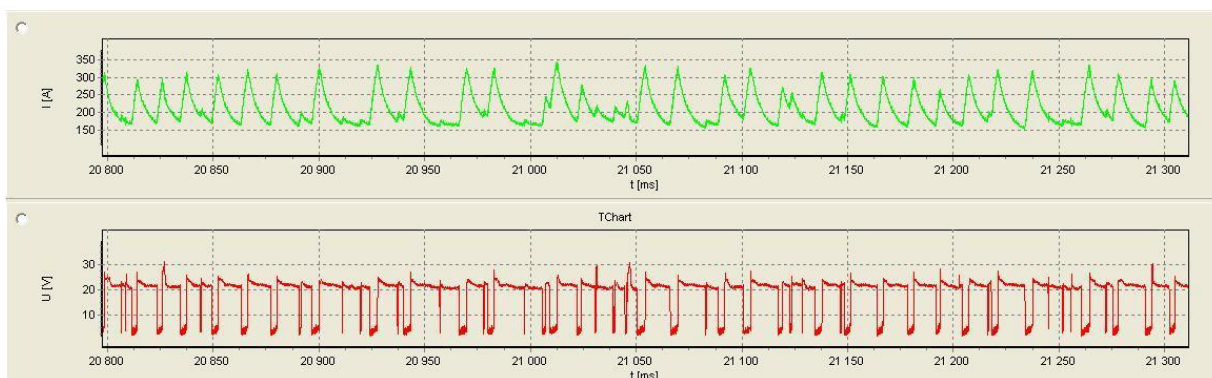
I ... intenzita svařovacího proudu [A]

v ... rychlost svařování [cm.s^{-1}]

η ... koeficient účinnosti přenosu tepla [-]

Housenka 1

Vzdálenost kontaktní špičky **A = 15 mm** a **B = 1,5 mm**. Typ housenky byl **kořenový** o skutečné svařovací délce **339 mm**. Parametry svařování v synergickém režimu jsou nastaveny dle svařovacího programu **P6**, intenzita svařovacího proudu **I = 195 [A]**, při svařovací rychlosti **0,3 m.min⁻¹**. Skutečné monitorované svařovací parametry mají však hodnoty svařovacího proudu **I = 215,9 [A]** a svařovacího napětí **U = 19,8 [V]**, rychlost svařování byla rovna **0,5317 cm.s⁻¹**, při rychlosti podávání drátu **6,216 m.min⁻¹**, průtok plynu byl roven **12 l.min⁻¹**. Koeficient účinnosti přenosu tepla měl hodnotu **$\eta = 0,8$ [-]**, za celkově vneseného tepla, dle vzorce (1.7), **$Q_c = 6,4319 \text{ kJ.cm}^{-1}$** . Přenos kovu v oblouku probíhal v přechodové oblasti, blízko hranice zkratu.



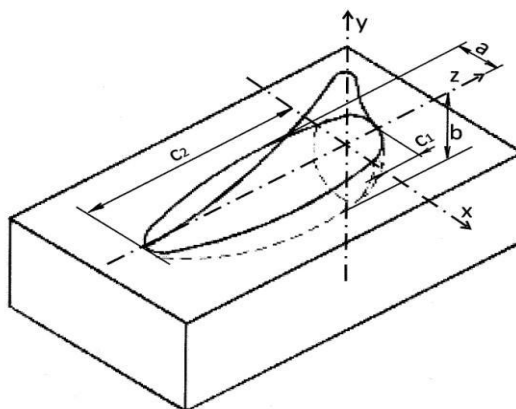
Obr.7.14: Výstup modulu UI laboratoř programu Weldmonitor, mapující průběh napětí a proudu - Housenka 1 /12/

Geometrie svarové housenky 1

K popisu double-elipsoidního zdroje tepla Obr.7.15 dle vzorců (1.2) a (1.3) jsou nutné parametry viz. Tab.7.6. Ty byly zjištěny z Obr. 7.16 a Obr.7.17. Celková plocha housenky je znázorněna na Obr.7.18. Výkon zdroje tepla udává vzorec (1.8).

$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_1 \cdot Q}{a \cdot b \cdot c \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{c^2}}, \quad (1.2.)$$

$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_2 \cdot Q}{a \cdot b \cdot d \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{d^2}}, \quad (1.3.)$$



Obr.7.15: Schéma dvou-elipsoidního zdroje tepla - Housenka 1 /3/

$$Q = U \times I \quad (1.8)$$

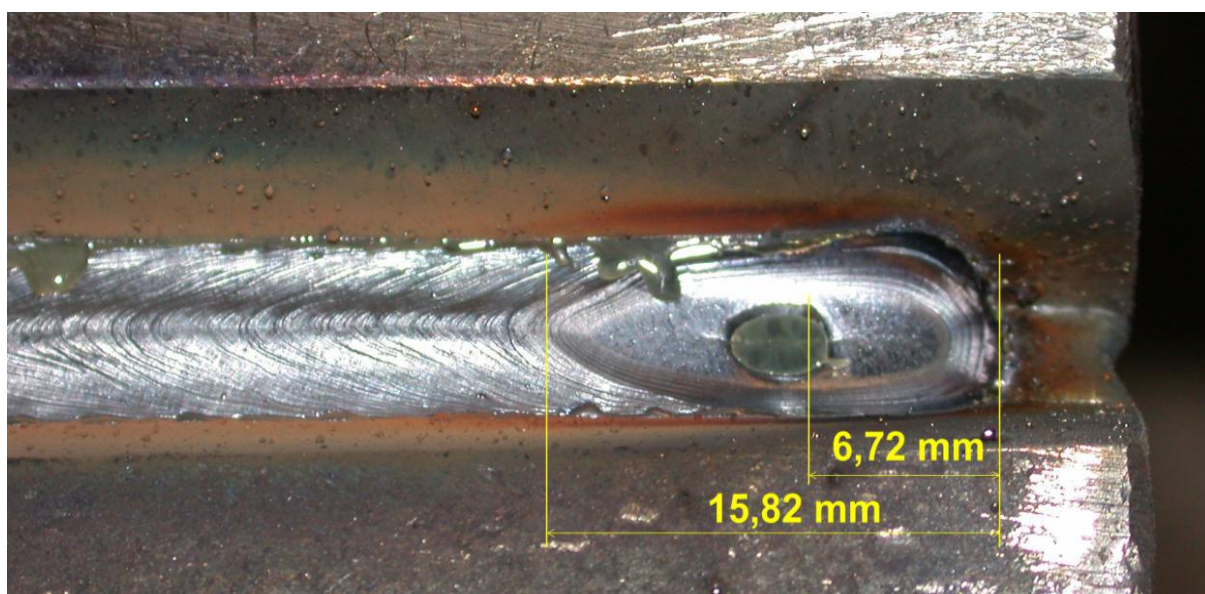
kde je:

U ... napětí svařovacího proudu [V]

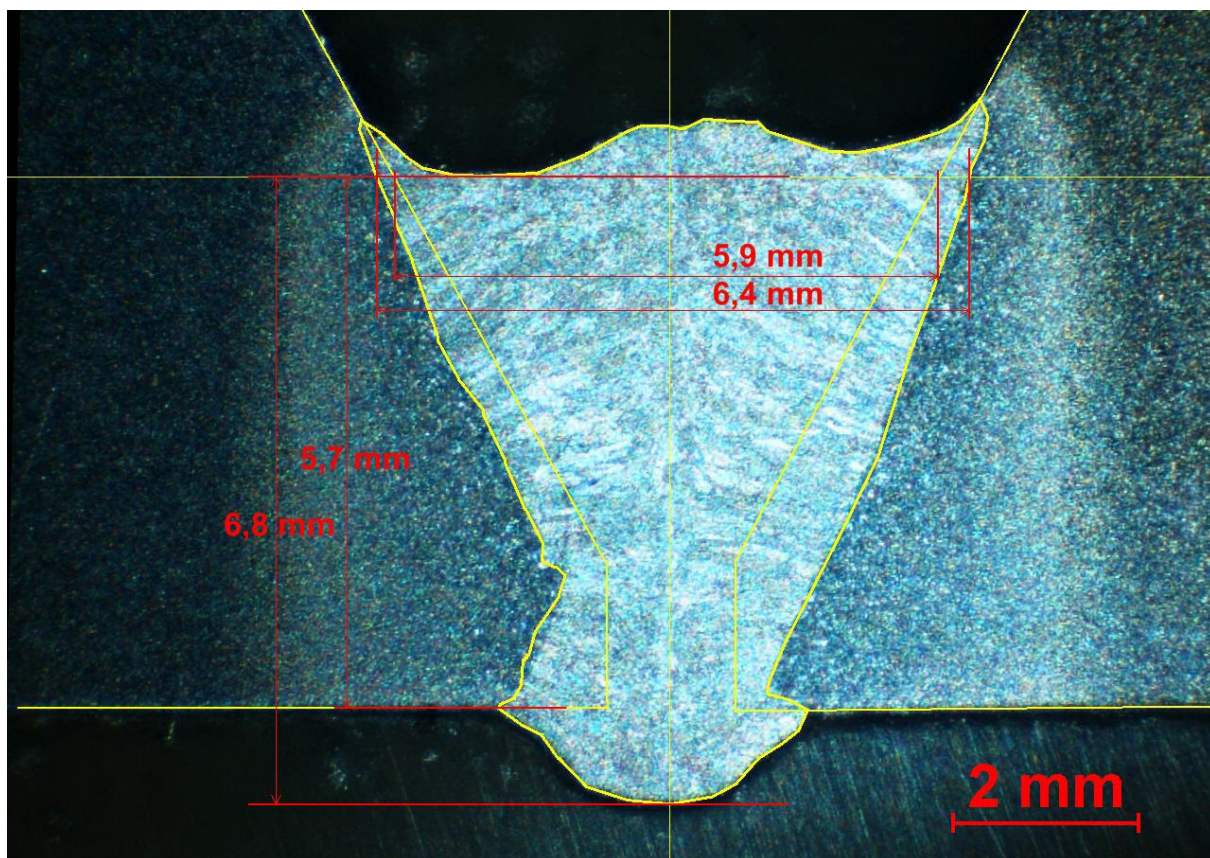
I ... intenzita svařovacího proudu [A]

Tab.7.6: Parametry potřebné k definování modelu dvou-elipsoidního zdroje /12/

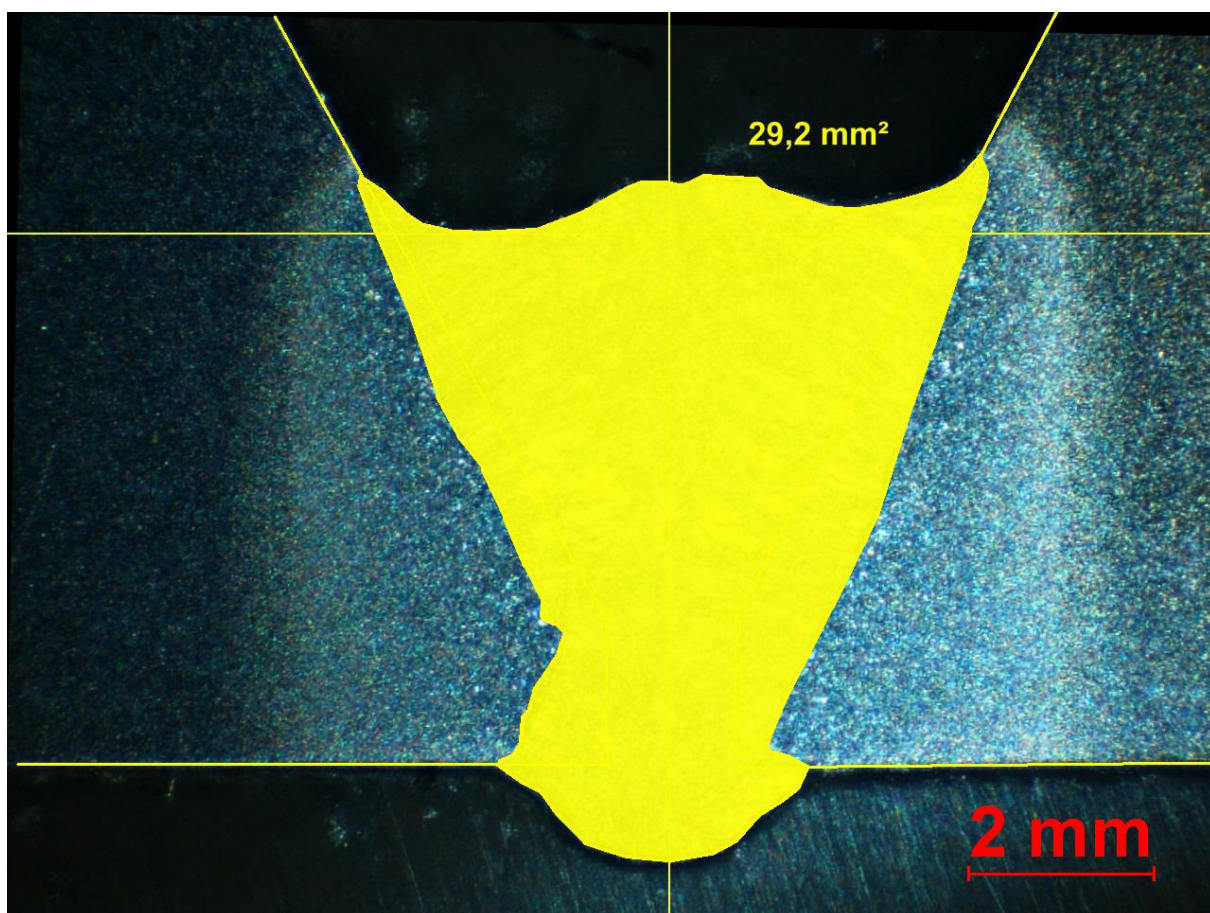
Parametr a [mm]	Parametr b [mm]	Parametr c1 [mm]	Parametr c2 [mm]	Celková plocha housenky [mm ²]	Plocha tvořená příd. mat. [mm ²]	Výkon zdroje Q [W]
3,2	5,7 (6,8)	6,72	9,1	29,2	21,4	4274,8



Obr.7.16: Konec kořenové housenky, včetně údajů pro definování double-elipsoidu /12/



Obr.7.17: Makrovýbrus kořenové housenky, včetně údajů pro def. dvojitého elipsoidu /12/



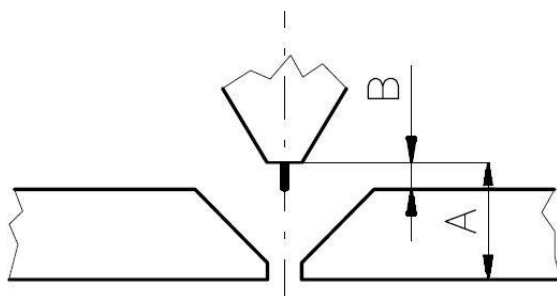
Obr.7.18: Celková plocha kořenové housenky 1 /12/

Housenka 2

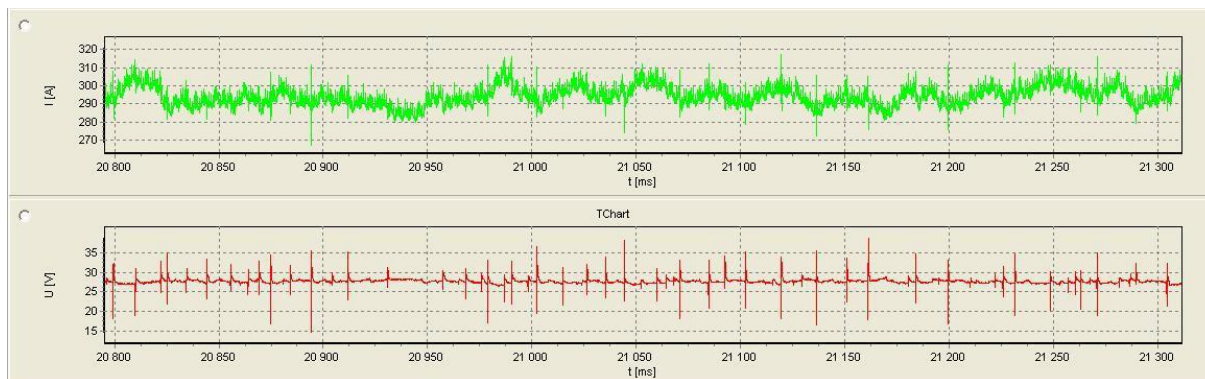
Sekundární housenka je výplňového typu, vzdálenost kontaktní špičky **A = 20,5mm** a **B = 8,5mm**, svařování probíhalo na délce **328mm**. Synergický režim svařování byl nastaven na program **P6**, velikost svařovacího proudu je roven **280 [A]** a rychlost svařování **0,4 m.min⁻¹**.

Vlastní svařování probíhalo při proudu o intenzitě **I = 295,3 [A]**, napětí **U = 27,7 [V]**. Rychlost vlastního svařování byla **v = 0,681 cm.s⁻¹** za podávání drátu rychlostí **8,598 m.min⁻¹**.

Ochranný plyn byl do místa utváření spoje přiváděn rychlostí **15 l.min⁻¹**. Účinnost přenosu tepla je stále **η = 0,8 [-]**. Při celkovém vneseném teple **Q_c = 9,609 kJ.cm⁻¹**. Kov v oblouku je přenášen v bezzkratové oblasti sprchovým přenosem.



Obr.7.19: Schéma vzdálenosti kontaktní špičky - Housenka 2 /12/



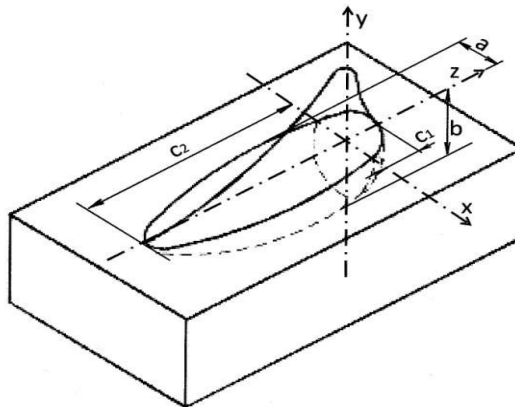
Obr.7.20: Výstup modulu UI laboratoř programu Weldmonitor, mapující průběh napětí a proudu - Housenka 2 /12/

Geometrie svarové housenky 2

Pro popis dvou-elipsoidního tepelného zdroje svařování Obr.7.21 dle vzorců (1.2) a (1.3) jsou nutné parametry viz. Tab.7.7. Potřebné parametry byly zjištěny z Obr.7.22 a Obr.7.23. Plochu výplňové housenky znázorňuje Obr.7.24.

$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_1 \cdot Q}{a \cdot b \cdot c \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{c^2}}, \quad (1.2.)$$

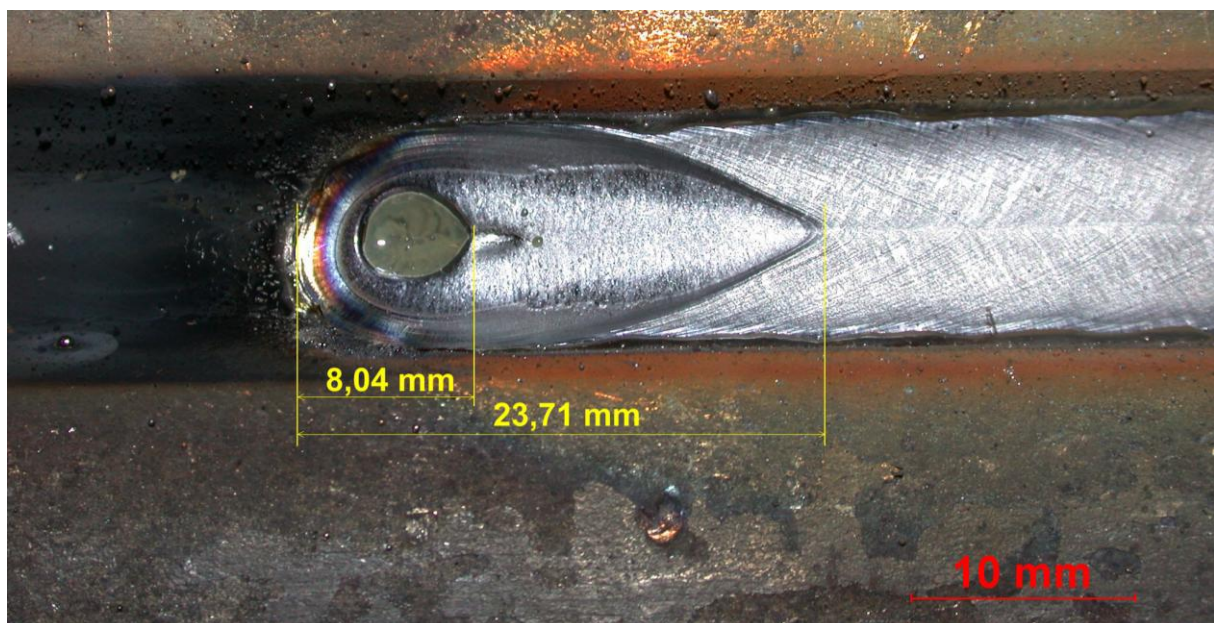
$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_2 \cdot Q}{a \cdot b \cdot d \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{d^2}}, \quad (1.3.)$$



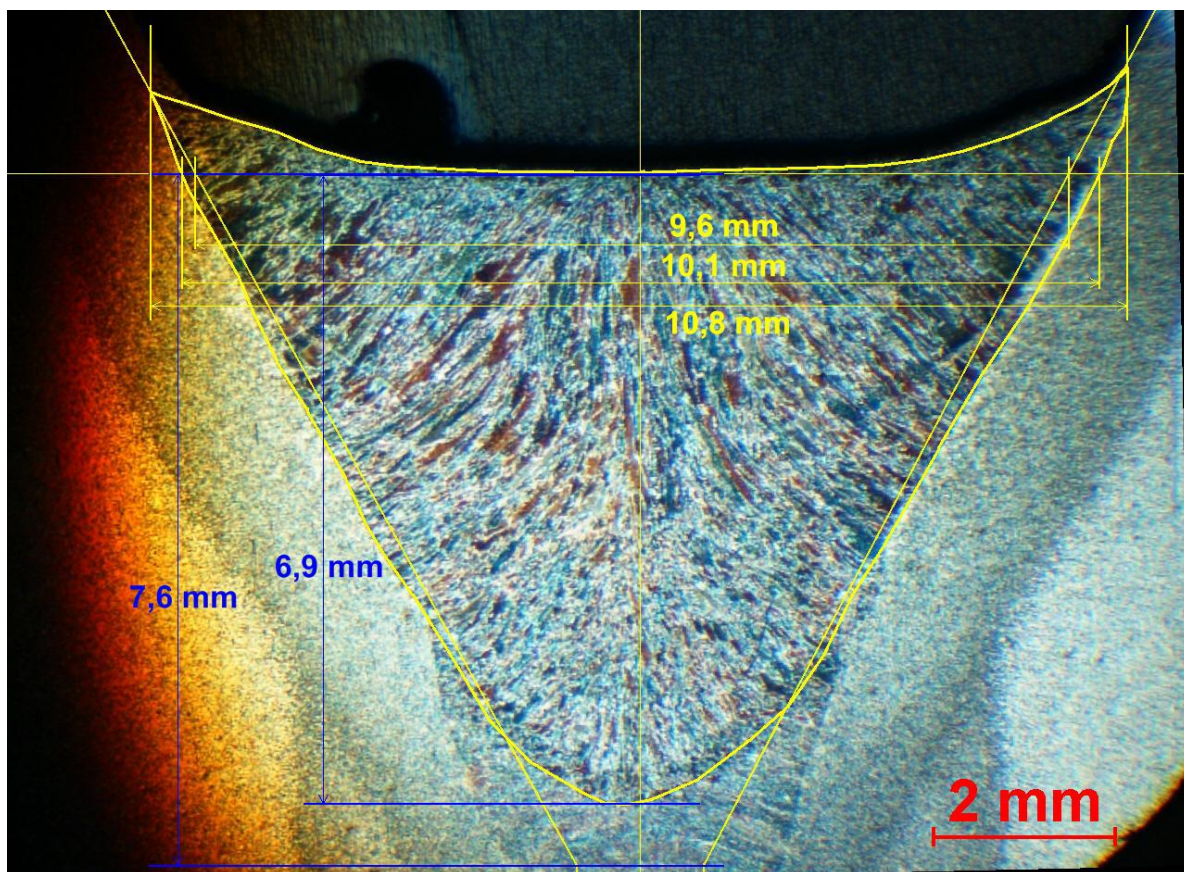
Obr.7.21: Schéma dvou-elipsoidního zdroje tepla - Housenka 2 /3/

Tab.7.7: Parametry potřebné k definici modelu dvou-elipsoidního zdroje - Housenka 2 /12/

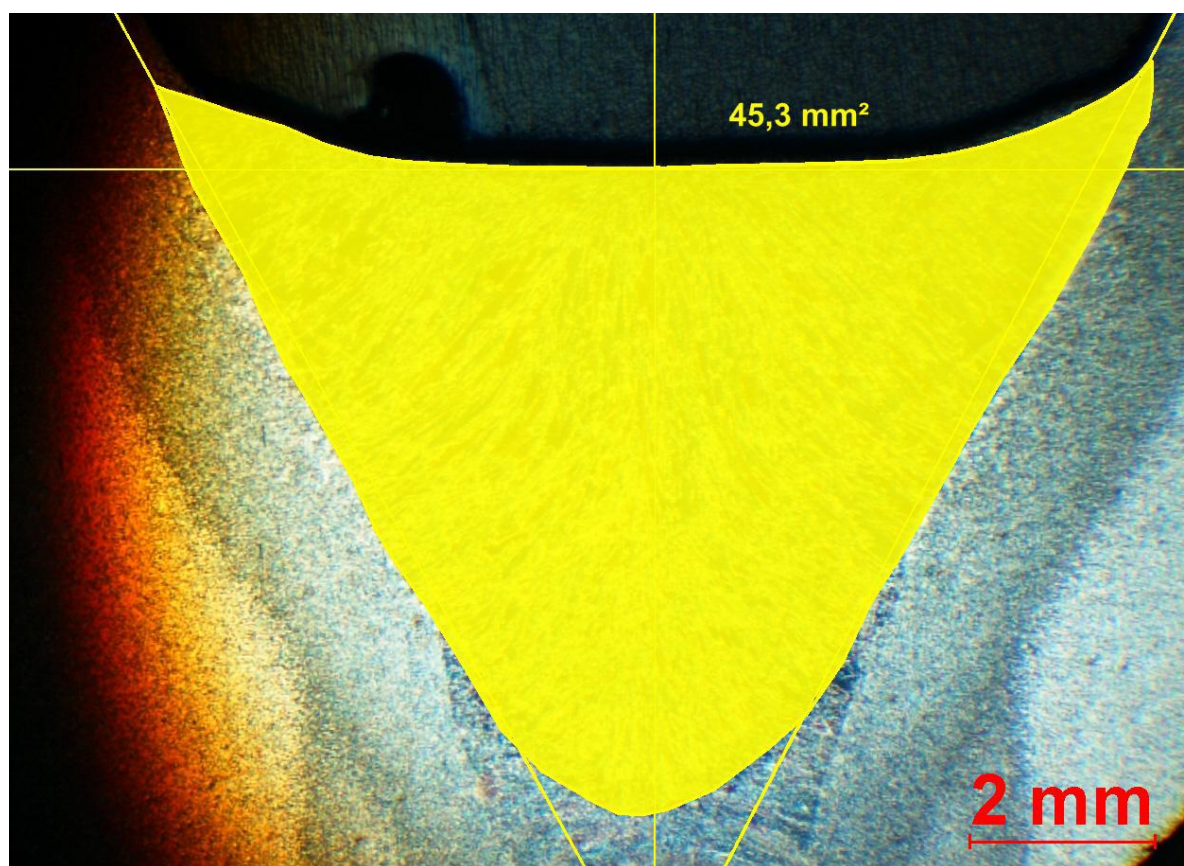
Parametr a [mm]	Parametr b [mm]	Parametr c1 [mm]	Parametr c2 [mm]	Celková plocha housenky [mm ²]	Plocha tvořená příd. mat. [mm ²]	Výkon zdroje Q [W]
5,05	6,9	8,04	15,67	45,3	27,1	8179,8



Obr.7.22: Konec výplňové housenky, včetně údajů pro definování modelu dvojitého elipsoidu - Housenka 2 /12/



Obr.7.23: Makrovýbrus výplňové housenky, včetně potřebných údajů - Housenka 2 /12/

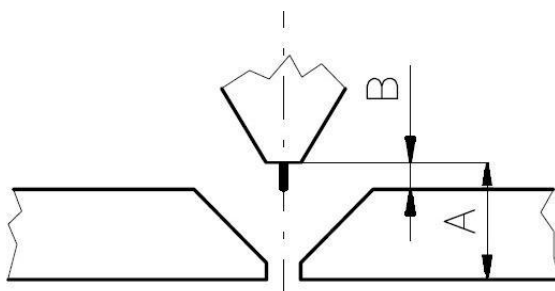


Obr.7.24: Celková plocha výplňové Housenky 2 /12/

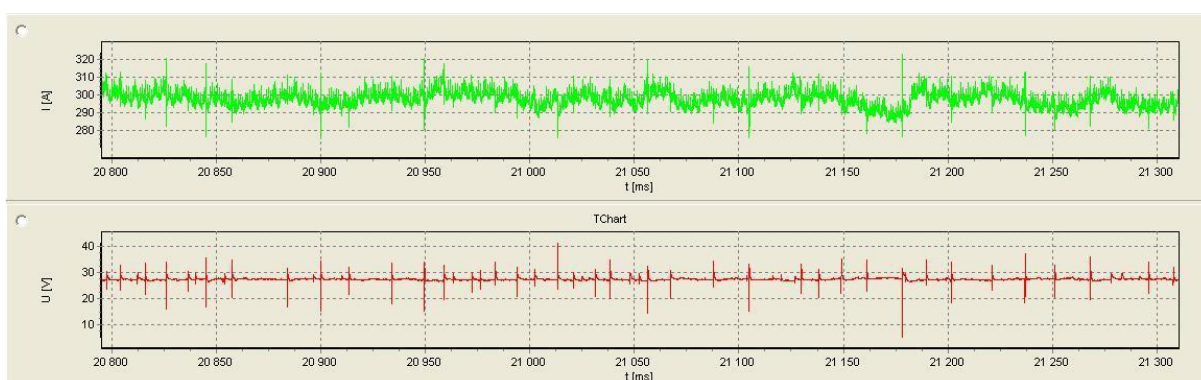
Housenka 3

Poslední housenka je krycího typu, vzdálenosti kontaktních špiček jsou $A = 23,5 \text{ mm}$, $B = 11,5 \text{ mm}$. Skutečná délka svařené housenky je 299 mm . Parametry synergického režimu jsou: $I = 280 \text{ [A]}$ a $0,4 \text{ m.min}^{-1}$ pro rychlost svařování. Číslo programu svářečky je **P6**.

Reálné hodnoty svařovacích parametrů jsou, pro intenzitu svařovacího proudu $I = 303,5 \text{ [A]}$, svařovací napětí $U = 27,4 \text{ [V]}$, rychlost svařování $v = 0,685 \text{ cm.s}^{-1}$, rychlost podávání drátu $8,605 \text{ m.min}^{-1}$. Průtok plynu je roven 18 l.min^{-1} , účinnost přenosu tepla zůstává $\eta = 0,8 \text{ [-]}$. Celkově se do svaru vneslo teplo o velikosti $Q_c = 9,712 \text{ kJ.cm}^{-1}$. Přenos kovu probíhá v bezzkratové oblasti sprchovým přenosem.



Obr.7.25: Schéma vzdálenosti kontaktní špičky - Housenka 2 /12/



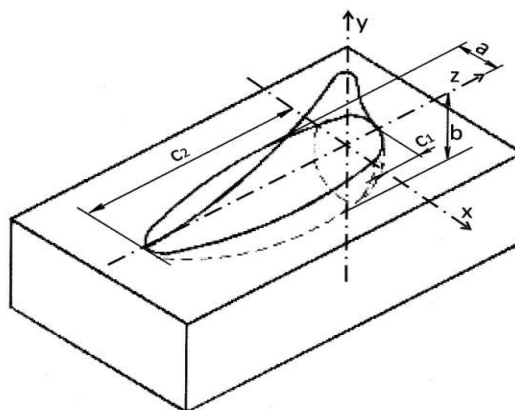
Obr.7.26: Výstup modulu UI laboratoř programu Weldmonitor mapující průběh napětí a proudu - Housenka 3 /12/

Geometrie svarové housenky 3:

Popis dvou-elipsoidního zdroje tepla při svařování viz. Obr.7.27 dle vzorců (1.2) a (1.3) jsou nutné parametry viz. Tab.7.8. Potřebné parametry byly zjištěny z Obr. 7.28 a Obr.7.29. Plochu výplňové housenky znázorňuje Obr.7.30.

$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_1 \cdot Q}{a \cdot b \cdot c \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{c^2}}, \quad (1.2.)$$

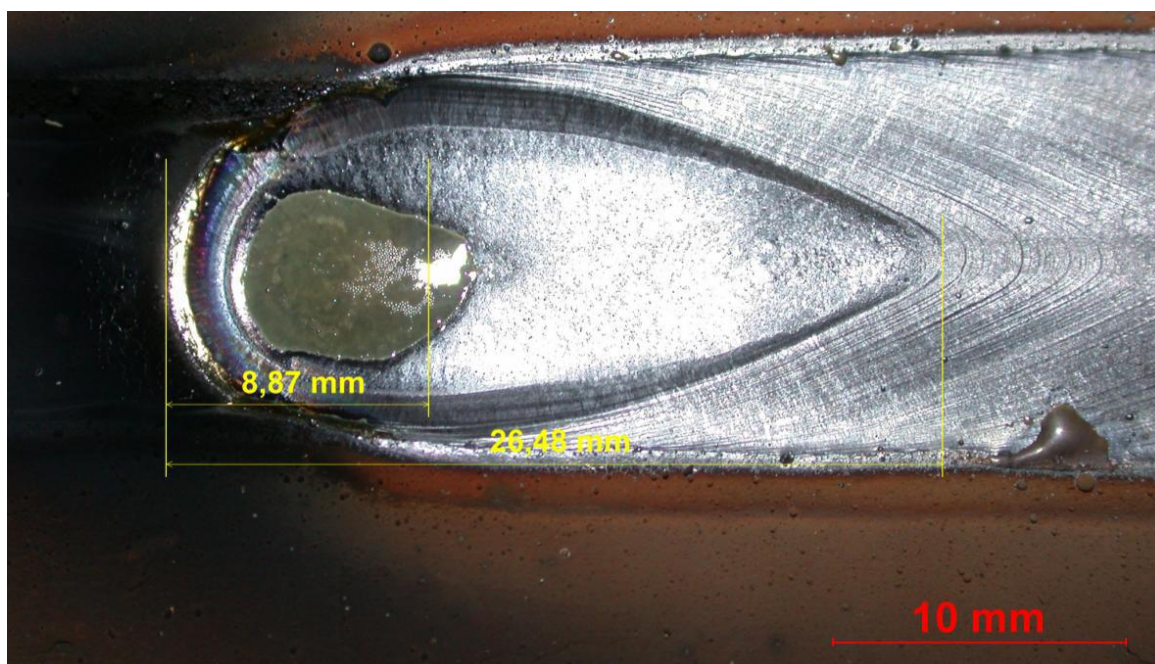
$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_2 \cdot Q}{a \cdot b \cdot d \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{d^2}}, \quad (1.3.)$$



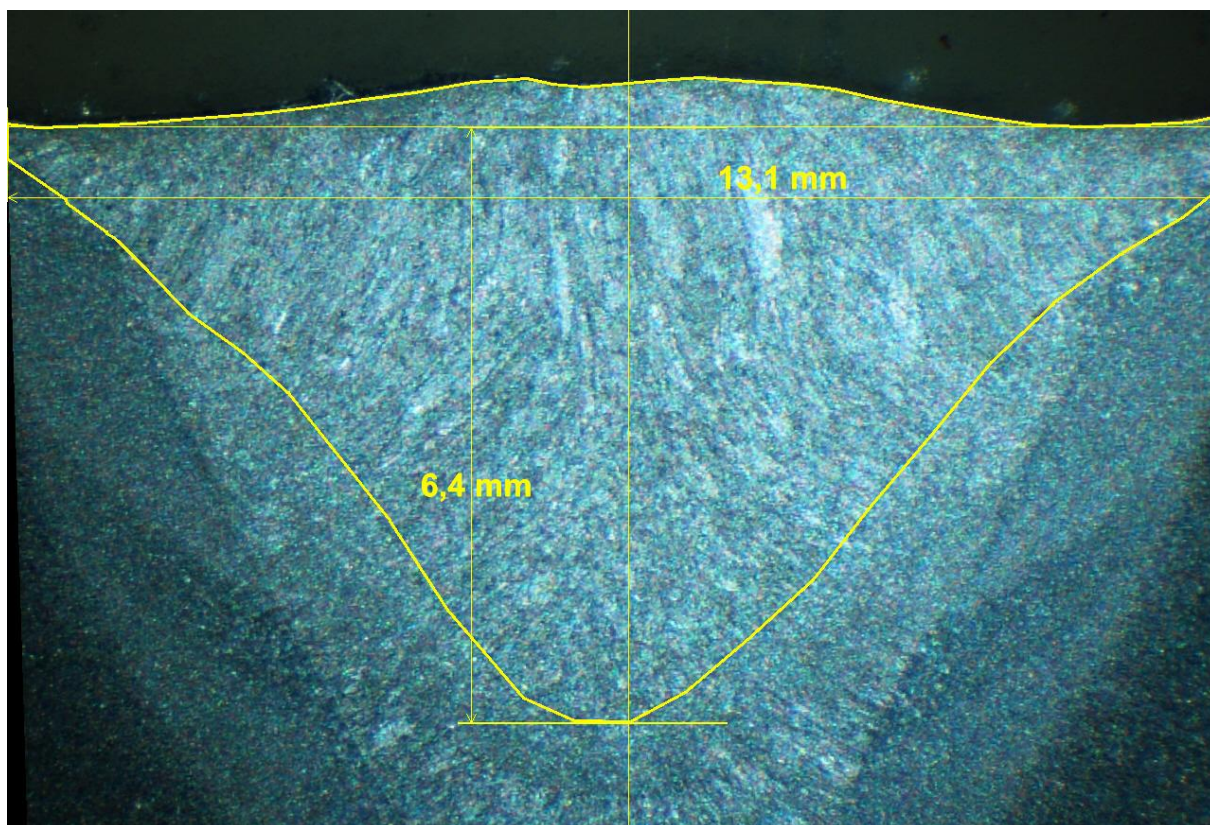
Obr.7.27: Schéma dvou-elipsoidního zdroje tepla - Housenka 3 /12/

Tab.7.8: Parametry potřebné k definici modelu dvou-elipsoidního zdroje - Housenka 3 /12/

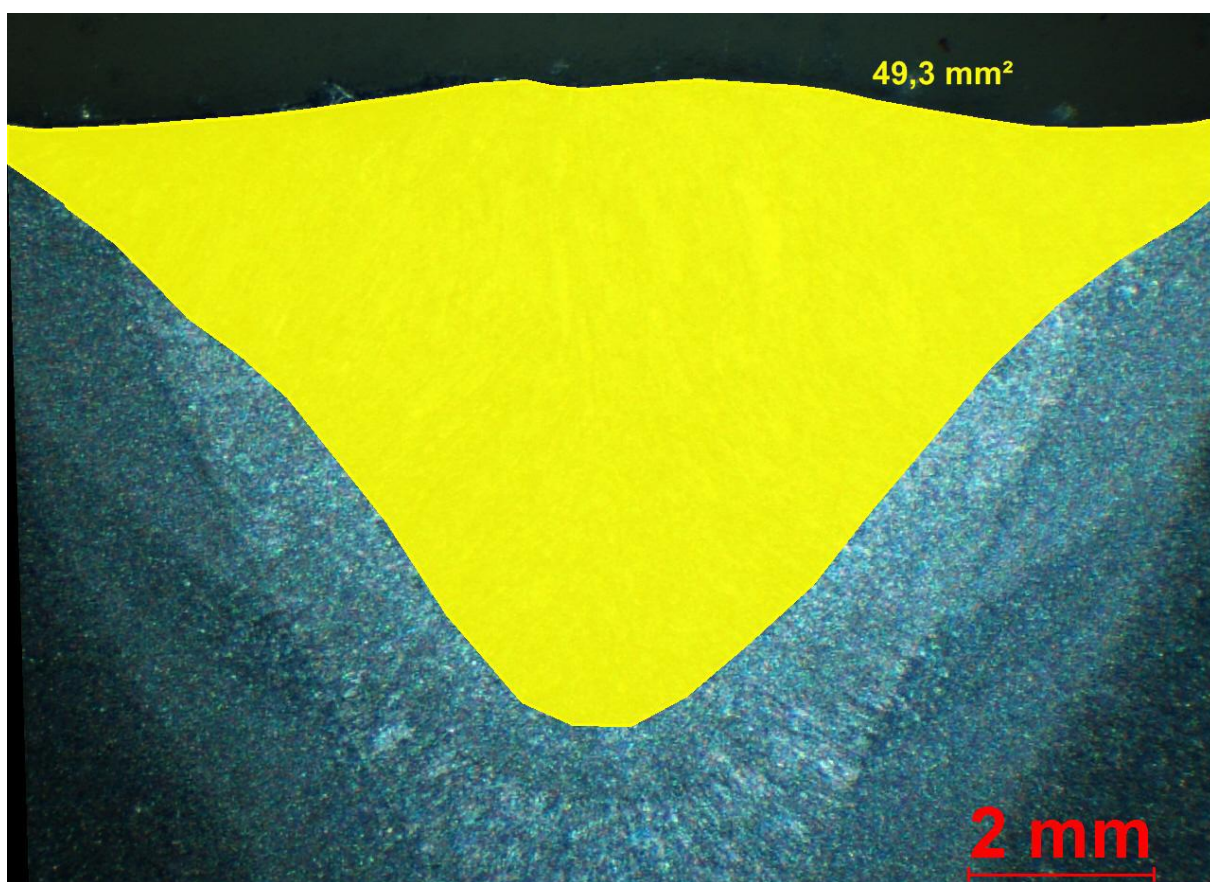
Parametr a [mm]	Parametr b [mm]	Parametr c1 [mm]	Parametr c2 [mm]	Celková plocha housenky [mm ²]	Plocha tvořená příd. mat. [mm ²]	Výkon zdroje Q [W]
6,55	6,4	8,87	17,61	49,3	31,3	8315,9



Obr.7.28: Konec krycí housenky, včetně údajů pro definování modelu dvojitého elipsoidu /12/

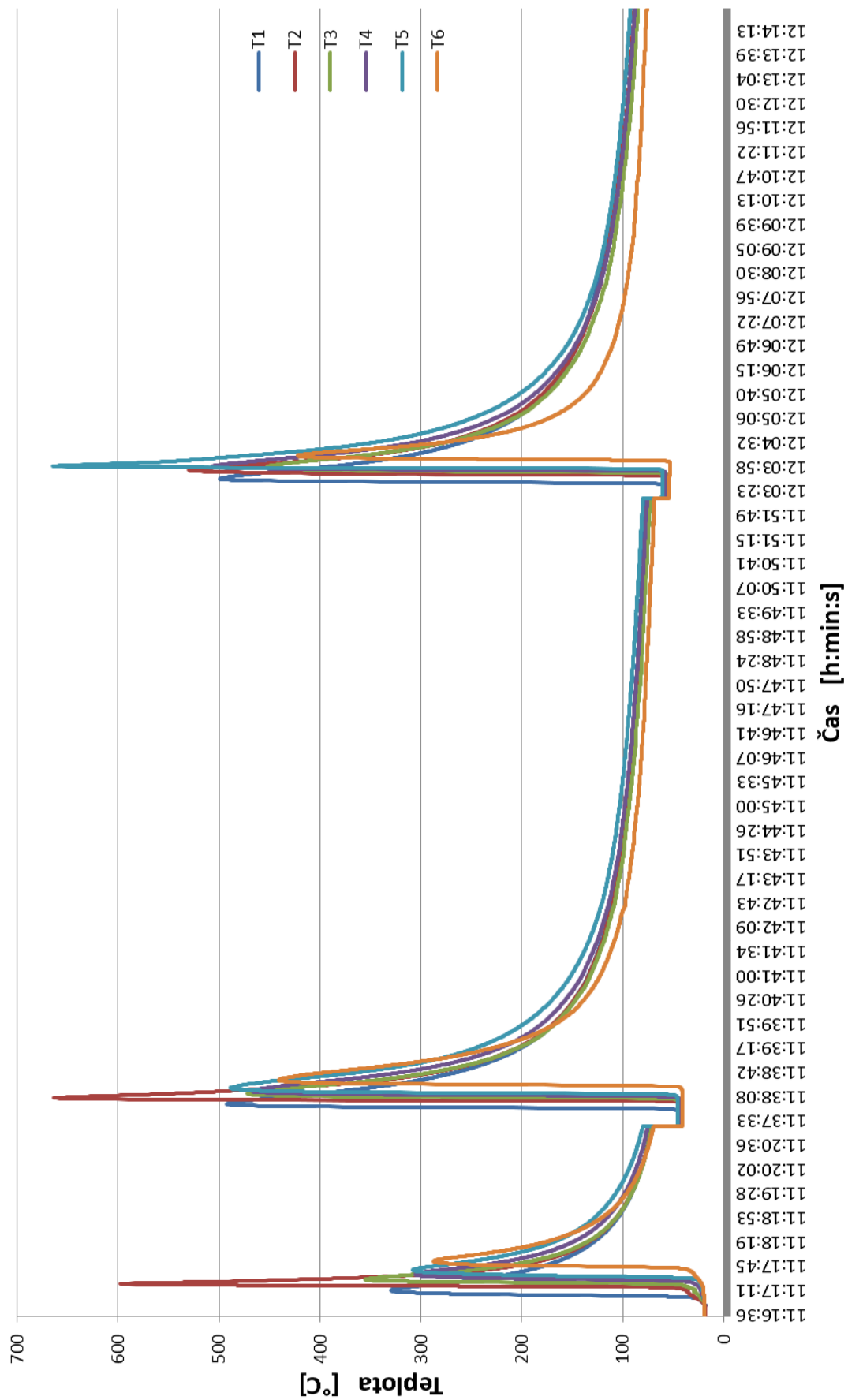


Obr.7.29: Makrovýbrus krycí housenky, včetně údajů pro definování modelu dvojitého elipsoidu /12/



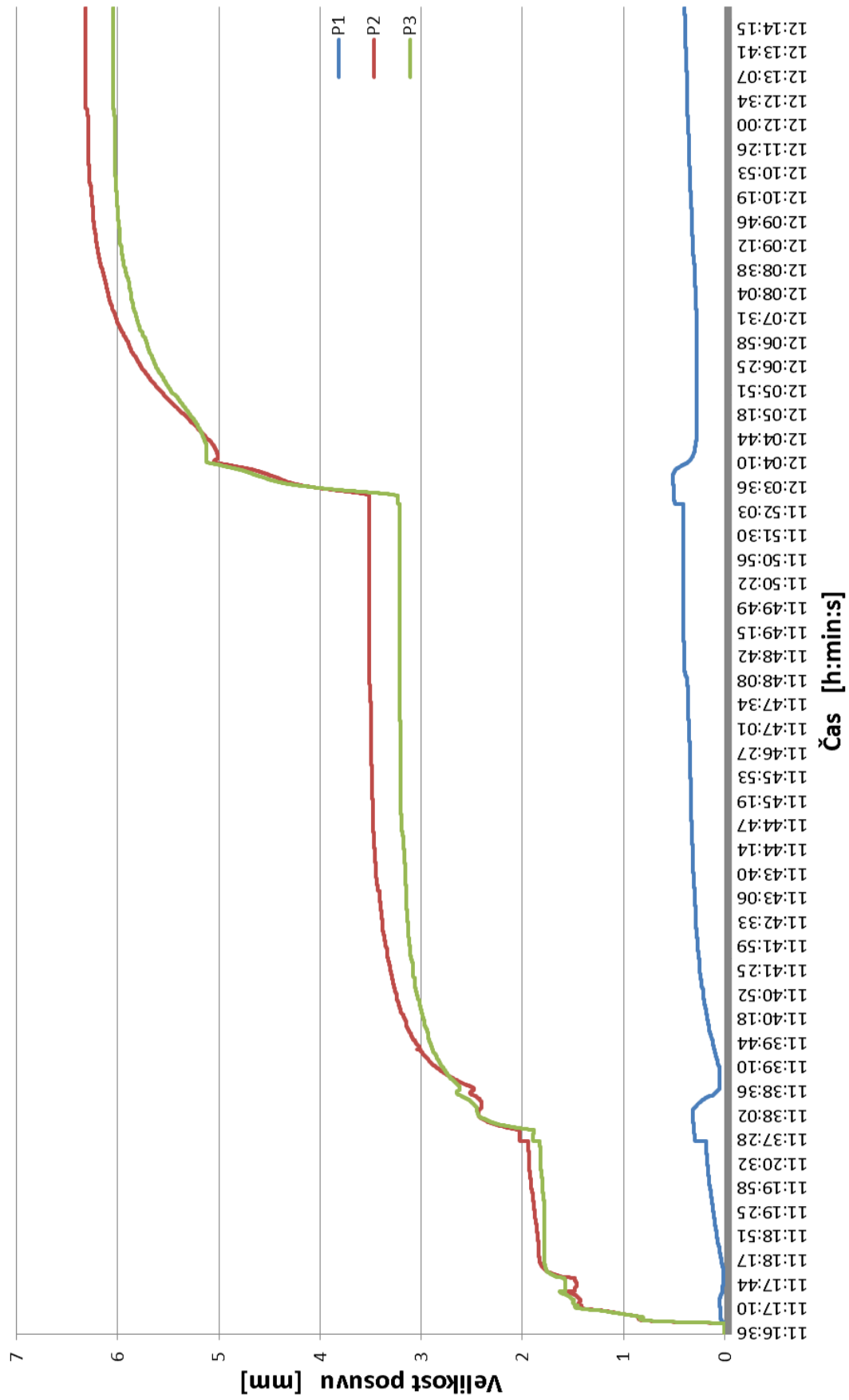
Obr.7.30: Celková plocha výplňové housenky 3 /12/

Průběh teploty pro termočlánky T1 až T6 pro všechny tři housešky



Obr. 7.31: Graf průběhu teplot ve svarku /12/

Graf měření deformací v definovaných směrech pro všechny tři housečky



Obr. 7.32: Graf deformací svarku /12/

8 Závěr - Vyhodnocení funkčnosti experimentálního pracoviště

V předložené bakalářské práci byla popsána realizace mechanizovaného svařovacího pracoviště, určeného k měření teplotních polí a deformací, včetně teoretického popisu funkce jednotlivých měřících komponent a zařízení a včetně zpracování výkresové dokumentace. Kompletní výkresová dokumentace je z důvodu místa uložena na příloženém CD. V příloze jsou ukázány pouze další výstupy měření teplotních polí a deformací.

Měřící zařízení prokázalo svou funkčnost v průběhu experimentálního svařování trojvrstvého tupého svaru (kapitola 8).

Pro jednotlivé svarové housenky byly na základě předchozích zkušebních experimentů nastaveny výchozí svařovací (procesní) parametry. Pomocí systému Weldmonitor byly zjištěny skutečné svařovací parametry. Kromě toho byly na konci svarové lázně a na makrovýbrusu měřeny geometrické údaje potřebné k definování dvouelipsoidního modelu zdroje tepla.

Dále byly pomocí nově vytvořeného měřicího systému a programu DiagWeld V0, během svařování a chladnutí měřeny teplotní pole ve svarku (6 termočlánků) a pomocí LVDT čidel měřeny údaje o probíhajících deformacích způsobených vneseným teplem.

Data byla ukládána v daných časových intervalech na zařízení USB ve formátu kompatibilním s programem Microsoft Office Excel. V programu Excel byl zápis naměřených údajů následně konvertován do formy grafů (Příloha: Graf_3-8) popisujících průběhy deformací a změny teplot v reálném čase.

Pracoviště pro měření teplotních polí a deformací funguje dle předpokladů. Naměřená data popisující teplotní pole a deformace jsou ve shodě se simulacemi programu Sysweld. Pomocí upínacího přípravku je zaručeno dostatečně tuhé upnutí s přesně definovaným přestupem tepla do okolí. Pomocí přípravku pro měření deformací, lze následně modulárně nastavit polohu měřících čidel dle požadavku měření a zkušebního vzorku.

9 Seznam použitých zdrojů

- [1] SVOBODA,P. – BARTOŠ,J. - BERNAS,J. - WEINBERG,J.: *Obloukové svařování*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1994. 216 s. ISBN: 80-85771-21-7.
- [2] MORAVEC,J.: *Analýza kritických míst programem MOVYPRO 07 na základě simulace v programu SYSWELD*. 1. vyd. Liberec: TUL, 2008. 99 s. ISBN: 978- 80-7372-403-0.
- [3] HUDEC,Z.: *Deformace a napětí při svařování*. 1.vyd. Liberec: TUL, 1998. 76 s. ISBN: 80-7083-313-0.
- [4] ČERNOHORSKÝ,J.: *Základní návod k obsluze zařízení Diagweld V0. 2012*
- [5] ČSN 05 0000: *Zváranie. Zváranie kovov. Základné pojmy*. 1988.
- [6] [online]Weldmonitor - Schéma zapojení pro měření svařovacích parametrů http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/schema_zapojeni.pdf [cit. 2013-04- 04].
- [7] [online]<http://www.electric.cz/Weldmonitor> [cit. 2013-15-04].
- [8] NOVOSAD,D - KLIKA,D - VÁCLAVÍK,V - ČÍP, O - KUDĚLKA,V -KADRŇKA,P.: *Systém pro monitorování a dokumentaci procesu svařování pomocí výpočetní techniky Weldmonitor 4.0*. [online]http://homen.vsb.cz/~hla80/Vyuka/WeldMonitor_final.pdf[cit. 2013-12- 04].
- [9] *Teplovní sondy*. Jakar Electronics, spol. s.r.o. [online]http://www.jakar.cz/sites/default/files/PDF/zpravodaje/jakar_100412.pdf [cit. 2013-20- 04].
- [10] [online]http://www.macrosensors.com/downloads/misc/primer_013103.pdf [cit. 2013-17-04].
- [11] [online]http://www.macrosensors.com/downloads/misc/primer_013103.pdf [cit. 2013-27-04].
- [12] MORAVEC,J.: TA02010992 *Vývoj a verifikace nových numerických metod svařování a tepelného zpracování, včetně zjednodušené numerické predikce životnosti svarových spojů, pro progresivní materiály využívané v energetice, leteckém a případně i kosmickém průmyslu*. technická zpr. č.: TUL-Z-12-VS-02, Liberec 2012
- [13] [online] <http://www.jirkaspol.cz/opticka-merici-sonda-tmpo.html> [cit. 2013-17-04].
- [14] MORAVEC, J.: *Analýza kritických míst svařovacího procesu na základě simulací v programu SYSWELD*. Disertační práce. Liberec 2008. ISBN 978-80-7372-315-6.
- [15] [program] Catia V5R20 2012, Dessault Systèmes

10 Seznam příloh

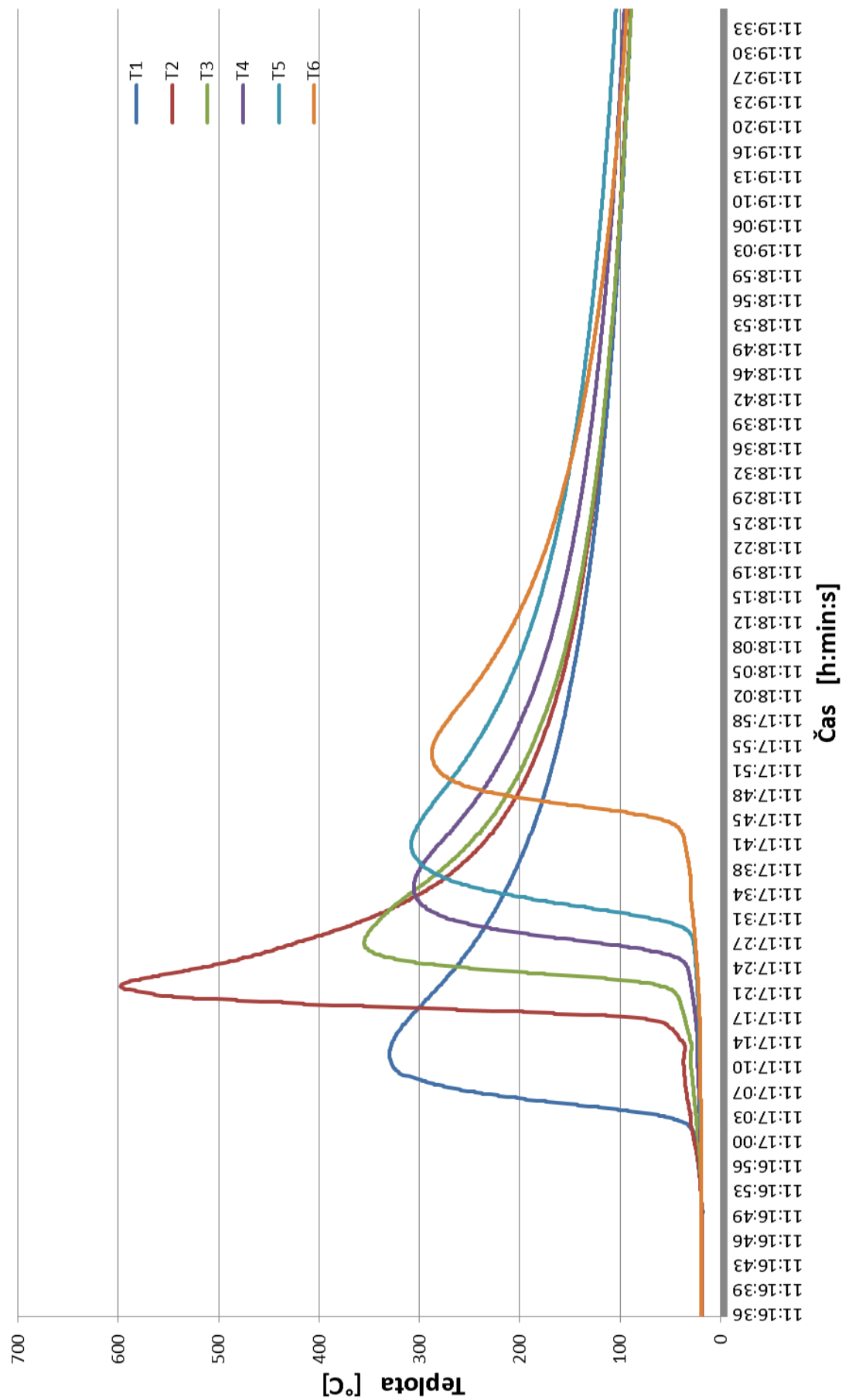
Příloha BP:

- Graf 3 - Graf měření průběhu teploty Housenka 1
- Graf 4 - Graf měření průběhu teploty Housenka 2
- Graf 5 - Graf měření průběhu teploty Housenka 3
- Graf 6 - Graf měření deformací v definovaných směrech Housenka 1
- Graf 7 - Graf měření deformací v definovaných směrech Housenka 2
- Graf 8 - Graf měření deformací v definovaných směrech Housenka 3

Přiložené CD:

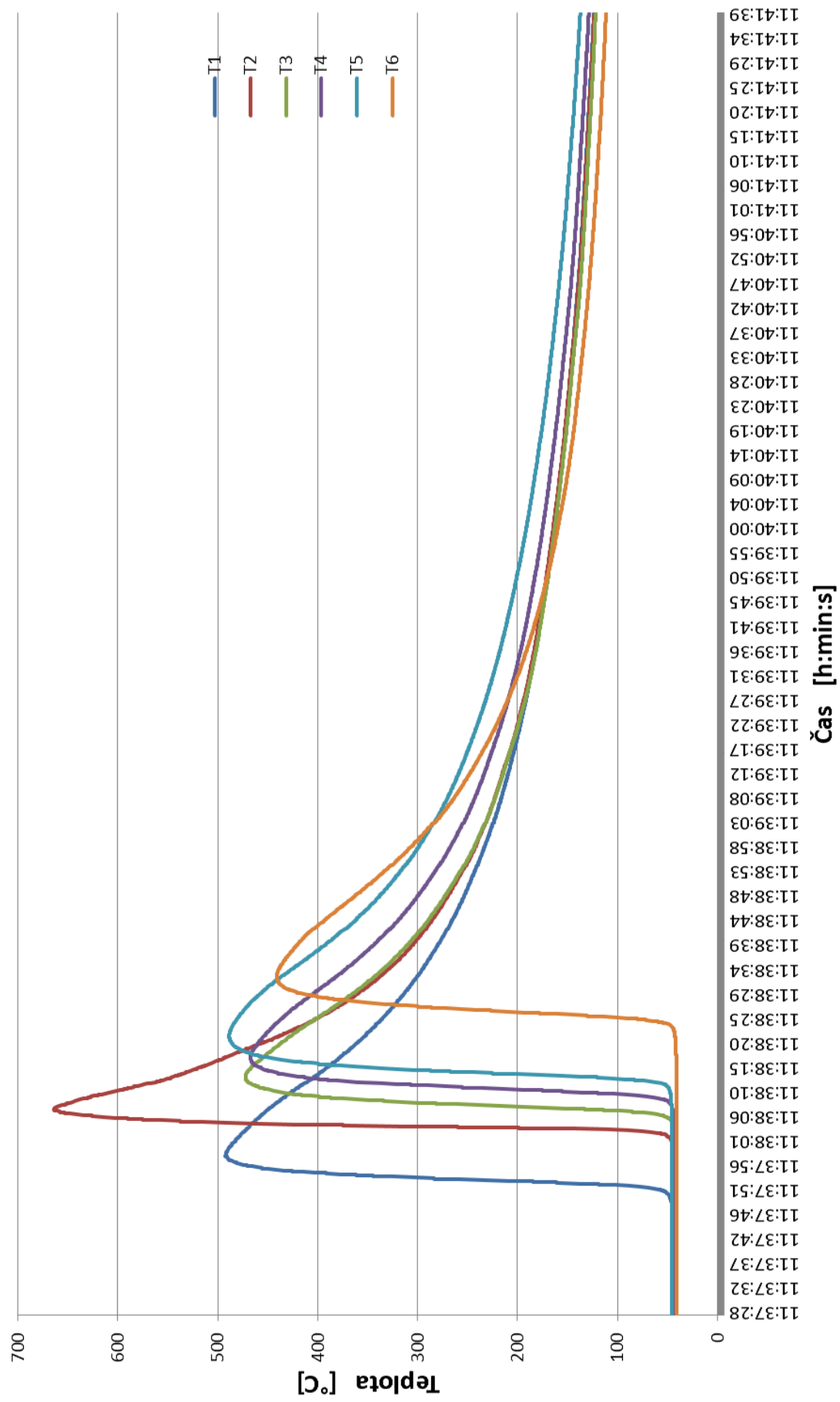
- Výkres 001 - Sestava 1
- Kusovník 001.1 - Nenormalizované díly
- Kusovník 001.2 - Normalizované díly
- Výkres 01.001 - Podsestava 1
- Výkres 02.001 - Podsestava 2
- Výkres 03.001 - Rám 1
- Výkres 04.001 - Pracovní deska
- Výkres 05.001 - Bočnice d12
- Výkres 06.001 - Bočnice d16
- Výkres 07.001 - Upínací stojan
- Výkres 08.001 - Rameno stojanu
- Výkres 09.001 - Svorka stojanu
- Výkres 10.001 - Rám 2
- Výkres 11.001 - Rýhovaná matice M6
- Výkres 12.001 - Rameno stojanu zkr.
- Výkres 13.001 - Spojovací čep
- Výkres 14.001 - Kontaktní váleček d12
- Výkres 15.001 - Kontaktní váleček d16
- Výkres 002 - Zkušební vzorek
- Výkres 003 - Návarek

Detail průběhů teploty pro termočlánky T1 až T6 - Svar č. 2 - Housenka č. 1



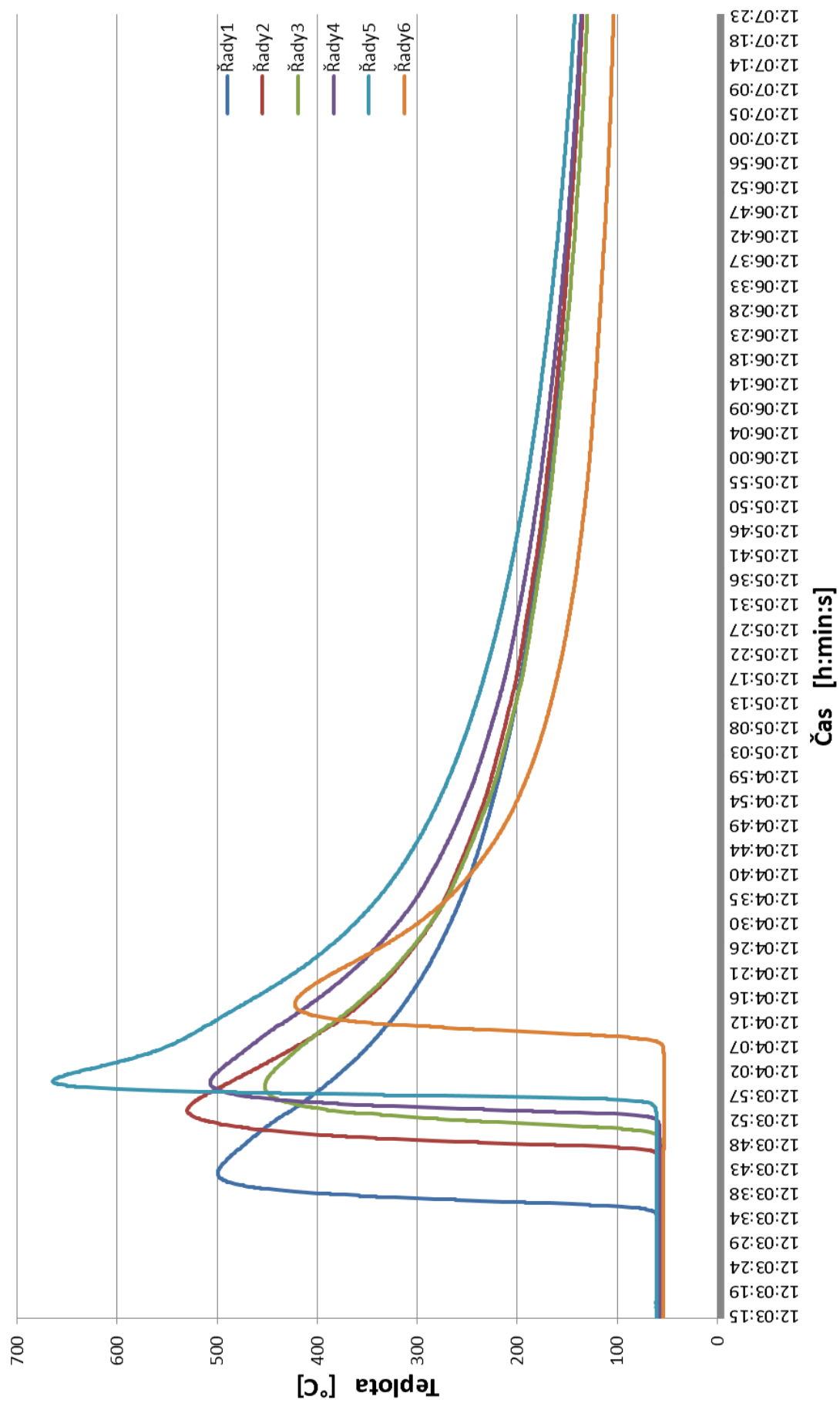
Graf měření průběhu teploty Housenka 1

Detail průběhů teploty pro termočlánky T1 až T6 - Svar č. 2 - Housenka č. 2



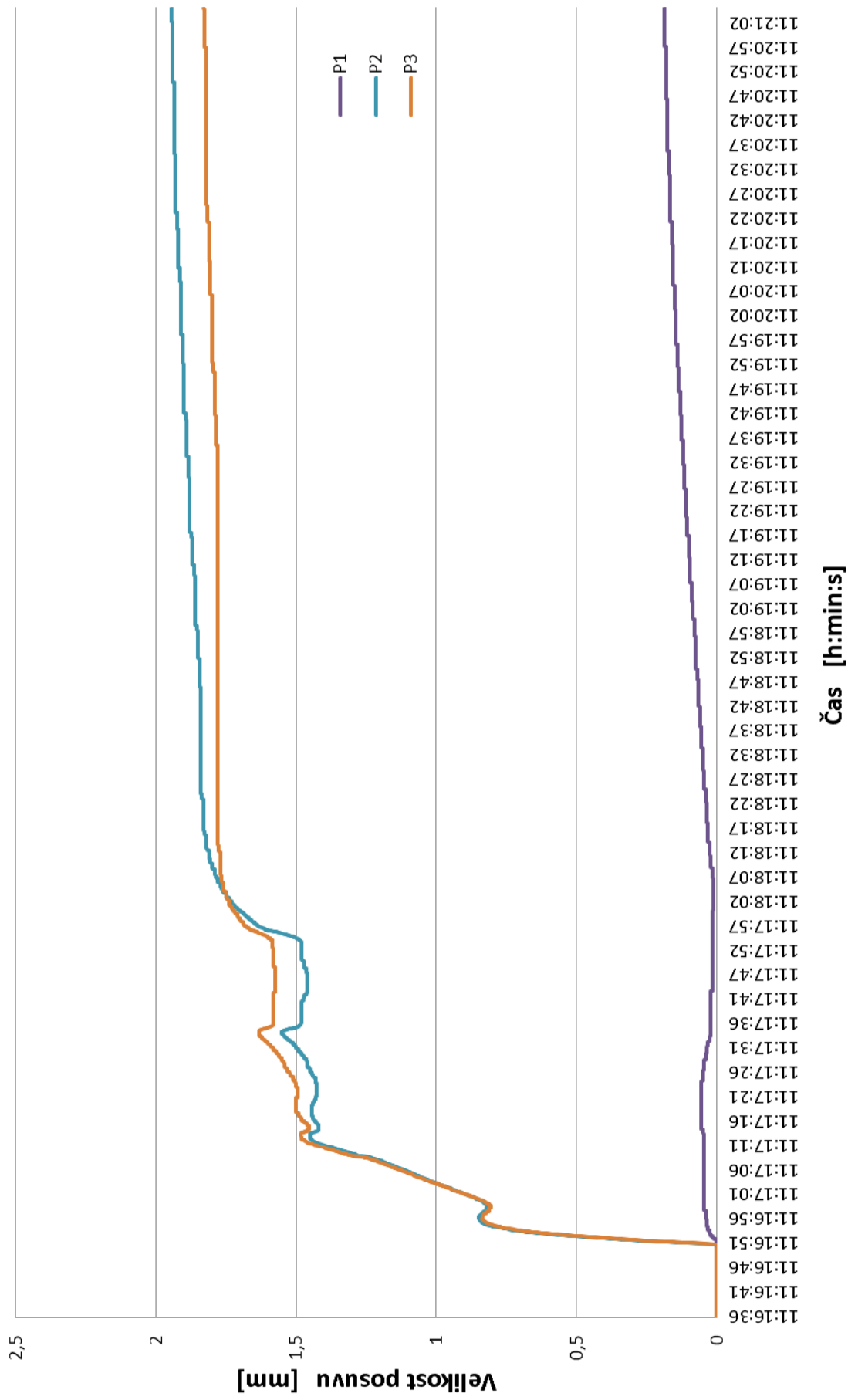
Graf měření průběhu teploty Housenka 2

Detail průběhů teploty pro termočlánky T1 až T6 - Svar č. 2 - Housenka č. 3



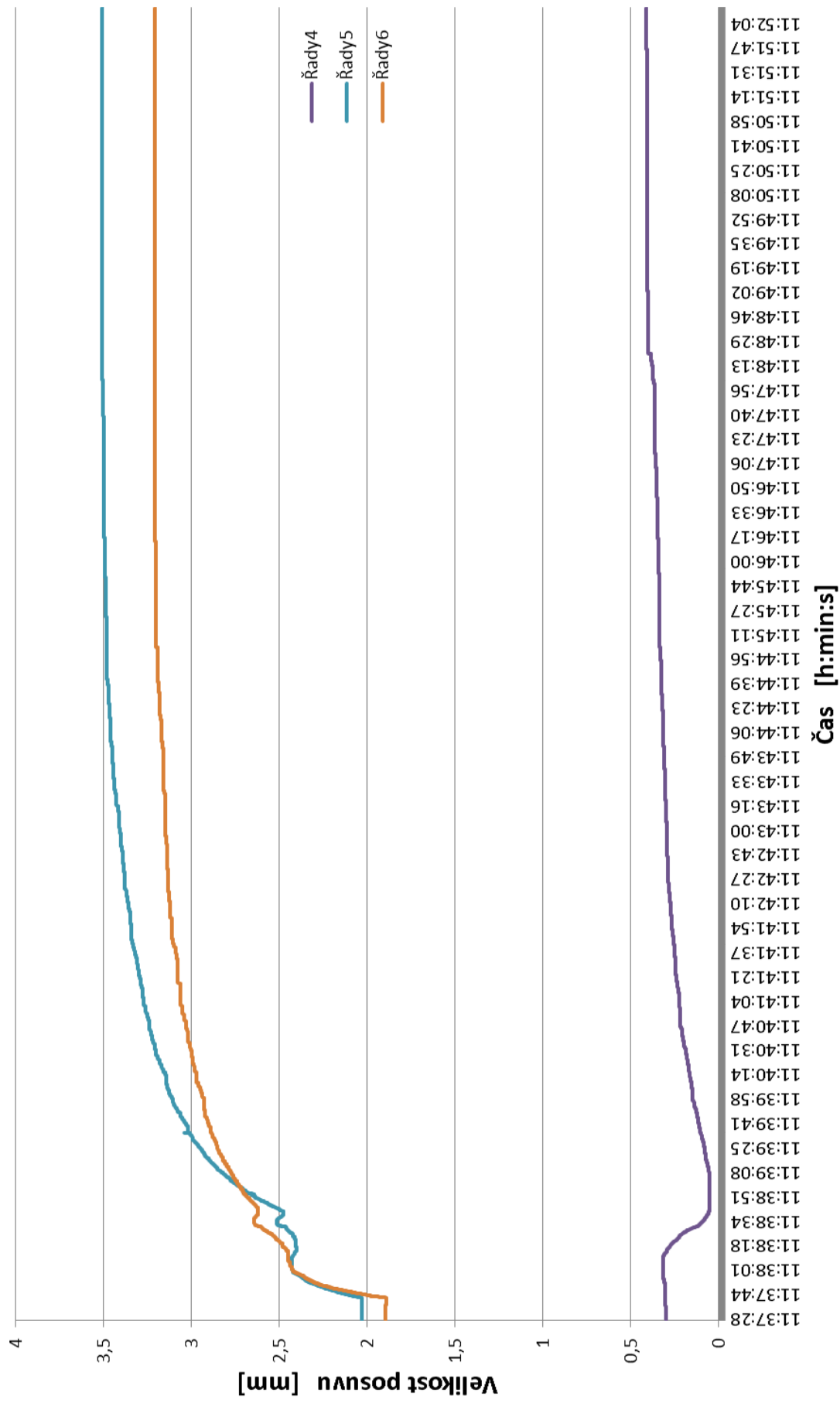
Graf měření průběhu teploty Housenka 3

Graf měření deformací v definovaných směrech - Svar č. 2 - Housenka č. 1



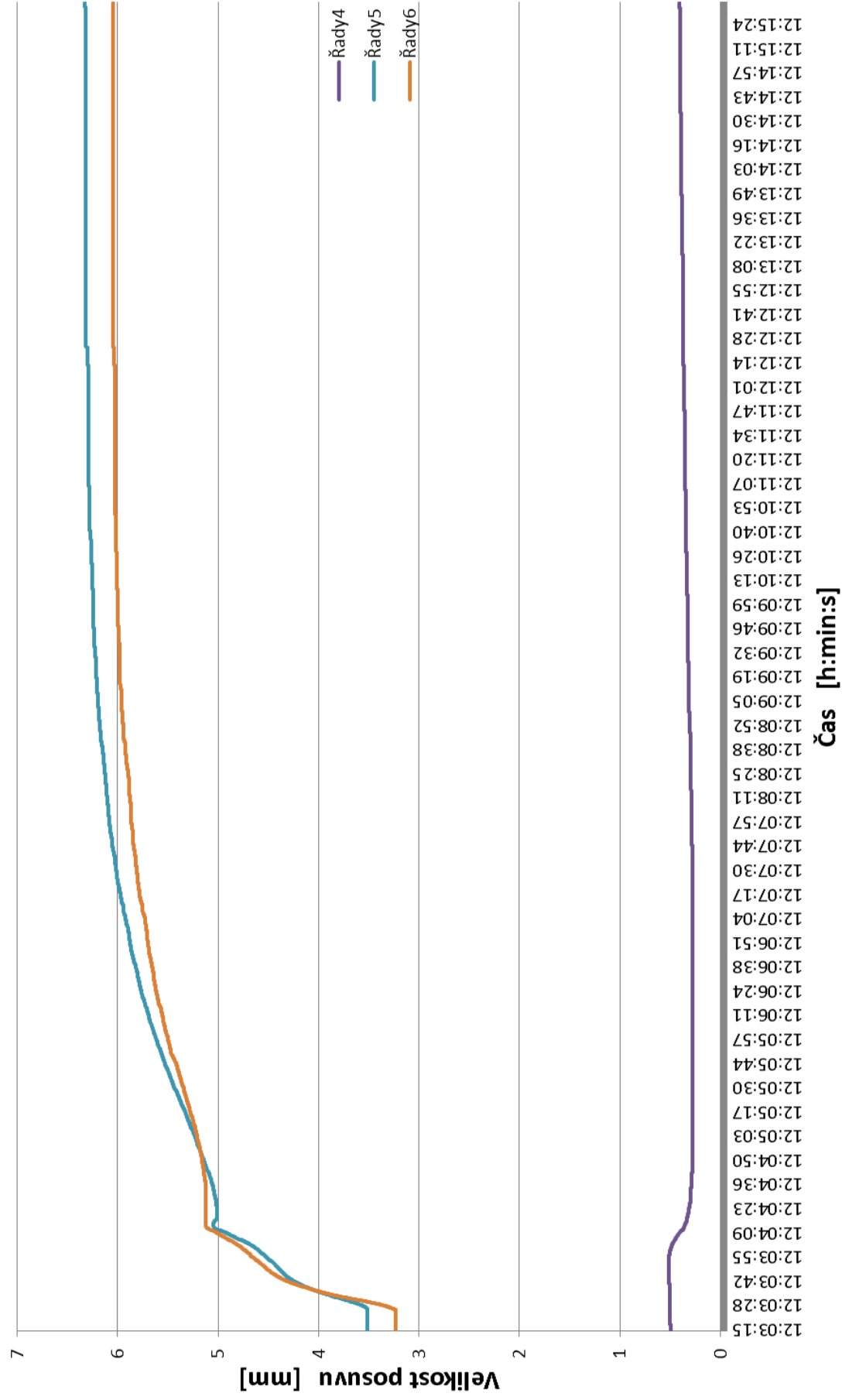
Graf měření deformací v definovaných směrech Housenka 1

Graf měření deformací v definovaných směrech - Svar č. 2 - Housenka č. 2



Graf měření deformací v definovaných směrech Housenka 2

Graf měření deformací v definovaných směrech - Svar č. 2 - Housenka č. 3



Graf měření deformací v definovaných směrech Housenka 3

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

24.5.2013

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/200 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

24.5.2013

Signature